

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta Strojní

Studijní program – B2341 Strojírenství

Katedra strojírenské technologie – zaměření strojírenská metalurgie

**Stanovení velikosti zrna u materiálu HR3C sloužící jako vstupní data
pro numerické simulace v programu SYSWELD**

**HR3C Steel Grain Size Assessment as Input Data for Numeric
Simulations in the SYSWELD Programme**

Lukáš Němeček

KSP-SM-B50

Vedoucí BP: Ing. Jaromír Moravec, Ph.D. –TUL - KSP

Konzultant: BP: Ing. Iva Nováková, Ph.D. – TUL – KSP

Rozsah práce:

Počet stran: 45

Počet tabulek: 4

Počet příloh: 9

Počet obrázků: 24

Datum: 24.5.2013

Oficiální zadání !!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

ANOTACE

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI **Fakulta strojní**

Katedra strojírenské technologie **Oddělení strojírenské metalurgie**

Studijní program: B2341 Strojírenství

Student: Lukáš Němeček

Téma práce: Stanovení velikosti zrna u materiálu HR3C sloužící jako vstupní data pro numerické simulace v programu SYSWELD
HR3C Steel Grain Size Assessment as Input Data for
Numeric Simulations in the SYSWELD Programme

Číslo BP: KSP-SM-B50

Vedoucí BP: Ing. Jaromír Moravec, Ph.D., TU v Liberci

Konzultant BP: Ing. Iva Nováková, Ph.D., TU v Liberci

Abstrakt

Cílem této bakalářské práce je ukázat postup při stanovení velikosti austenitického zrna konstrukční oceli a následné využití těchto údajů pro potřeby simulačních výpočtů svařování a tepelného zpracování.

Práce je rozdělena do dvou částí - teoretické a experimentální. V teoretické části je popsán jednak způsob růstu a hrubnutí austenitického zrna, ale také způsoby umožňující jeho zjemnění. Dále jsou zde popsány základní teplotní cykly vedoucí ke změnám struktury, jednotlivé struktury, ale také způsoby tepelného zpracování odpovídající rychlostem ochlazování použitým v experimentální části.

Praktická část se věnuje vlastním experimentům vedoucím ke zhrubnutí zrna. Pro tyto experimenty byla použita austenitická ocel HR3C využívaná v energetickém průmyslu. Dále je zde popsáno stanovení velikosti zrna u této

oceli podle normy ČSN EN ISO 643 a následné využití získaných výsledků pro potřeby numerických simulací.

Abstract:

The objective of this B.A. thesis is to describe the procedure used to assess an austenitic grain size and the subsequent usage of this data in simulation calculations of welding and heat processing. The thesis is divided into two parts, a theoretic one and an experimental one. In the theoretic part we describe the process of growth and roughening of an austenitic grain, but also the methods to make it finer. It also describes the individual structures, basic temperature cycles leading to changes in the structures and also methods of heat processing as corresponding to the cooling speeds used in the experimental part.

The practical part of the thesis deals with the experiments leading to the roughening of the grain. These experiments employed austenitic steel HR3C used in the energetic industry. The thesis also describes the method of grain size assessment for this steel according to the norm ČSN EN ISO 643 and the subsequent usage of the obtained results for numeric simulations.

Místopřísežné prohlášení

Místopřísežně prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně s použitím literatury v níže uvedeném seznamu.

V Liberci 24. 5. 2013

.....

Lukáš Němeček

Velký Dřevíč 253

Hronov

Poděkování

Touto cestou bych chtěl poděkovat mému vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Jaromíru Moravcovi, Ph.D. za trpělivost a cenné rady a zkušenosti při tvorbě mé bakalářské práce.

Rovněž bych dále chtěl poděkovat Ing. Ivě Novákové, Ph.D. a Ing. Jiřímu Beranovi, CSc. za odbornou pomoc.

Na závěr děkuji všem, kteří se podíleli menší či větší měrou na mé bakalářské práci.

Obsah:

1 Úvod.....	3
2 Teoretická část.....	4
2.1 Teorie kalení.....	4
2.2 Druhy kalení.....	5
2.2.1 Anizotermická přeměna.....	5
2.2.2 Izotermická přeměna.....	6
2.3 Struktury vzniklé při ochlazování.....	7
2.3.1 Rovnovážné struktury.....	7
2.3.2 Nerovnovážné struktury.....	8
2.3.3 Růst austenitického zrna.....	10
2.3.4 Zjemnění zrn.....	12
2.4 Vnitřní pnutí.....	14
2.5 Kalicí prostředí.....	14
2.5.1 Kalicí prostředí – voda.....	16
2.5.2 Kalicí prostředí – olej.....	16
2.5.3 Kalicí prostředí – vzduch.....	16
2.5.4 Kalicí prostředí – teplé lázně.....	17
2.6 Ohřev.....	17
2.6.1 Komorová pec.....	18
2.6.2 Šachtová pec.....	18
2.6.3 Vakuová pec.....	18
3 Praktická část bakalářské práce.....	19
3.1P Materiál zkoumaných vzorků.....	19
3.2Postup měření.....	21
3.3 Určení velikostí austenitických zrn.....	22
3.4 Numerická simulace –program SYSWELD.....	32
4 Závěr.....	35
5 Seznam použité literatury.....	37
6 Obsah příloh.....	38

Seznam symbolů a značek

L	skutečné délce na vzorku	[mm]
X	délka rozměru na fotografii	[mm]
A	měřítka na fotografii ($A = 0,1 \text{ mm}$)	[mm]
B	měřítka na fotografii	[mm]
Lineární metoda		
n_1	počet zrn protnutých	[-]
n_2	počet zrn dotýkajících se úsečky	[-]
n_3	počet zrn dotýkající se konc. a poč. bodu úsečky	[-]
L_x	skutečná délka vodorovné úsečky	[mm]
L_y	skutečná délka svislé úsečky	[mm]
$L_{/}$	skutečná délka úsečky pod úhlem 45°	[mm]
N_A	počet zrn na úsečce L_x	$[\text{mm}^{-1}]$
N_B	počet zrn na úsečce L_y	$[\text{mm}^{-1}]$
N_C	počet zrn na úsečce $L_{/}$	$[\text{mm}^{-1}]$
N_L	průměrný počet zrn	$[\text{mm}^{-1}]$
l	průměrná délka jednotlivých úseků	[mm]
Planimetrická metoda		
n_1	počet zrn uvnitř definovaného obrazce	[-]
n_2	počet zrn protnutých hranicí definovaného obrazce	[-]
n_3	rohová zrna definovaného obrazce	[-]
n_{100}	celkový počet rovnocenných zrn	[-]
m	počet zrn na milimetr čtvereční	$[\text{mm}^{-2}]$
d	střední průměr zrna	[mm]
Program SYSWELD		
D	velikost zrna	[mm]
T	absolutní teplota	[K]
Q	aktivační energie	$[\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}]$
R	plynová konstanta	$[\text{J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}]$
a	konstanta, vyjadřuje difúzi po hranicích zrn	[-]
C	materiálová konstanta	$[\text{mm}^a \cdot \text{s}]$

1 Úvod

Neustálá snaha po zvyšování provozních parametrů energetických a chemických zařízení si vyžaduje i trvalý vývoj nových materiálů, schopných za daných podmínek pracovat. Žáropevné oceli lze bezesporu mezi takové materiály zařadit. Musí splňovat řadu kritérií, která jsou často protichůdná. Hlavní podmínkou je zvýšená odolnost vůči dlouhodobému zatížení při vysokých teplotách. Neméně důležitá je i dostatečná odolnost proti korozi, která se projevuje tvorbou kompaktní oxidické vrstvy na povrchu oceli. Aplikace těchto nových materiálů a zvládnutí technologických procesů jejich výroby, zpracování, případně spojování, je doprovázena snahou o uplatnění simulačních výpočtů. Zejména numerické simulace mohou do značné míry eliminovat rizika spojená s výskytem nepříjemných vad, nebo vést k eliminaci vnitřních pnutí způsobených procesem.

Program SYSWELD patří mezi nejčastěji využívané programy pro tento typ výpočtů v oblasti svařování a tepelného zpracování. Při predikci struktury a výsledných vlastností v oblasti svarových spojů je nezbytná znalost velikosti zrna a to jak pro výchozí stav materiálu, tak i v průběhu změn nastávajících při svařovacím procesu. Změna velikosti zrna se projeví jak na změně mechanických vlastností, tak i na změně tvaru a umístění jednotlivých křivek ARA diagramu, definujících jednotlivé oblasti výsledných struktur. Proto jsou v této bakalářské práci ukázány a popsány postupy vedoucí jednak ke zhrubnutí zrna u tepelně exponovaných vzorků, ale především následné postupy umožňující na těchto vzorcích stanovit různými způsoby velikost austenitického zrna. Kromě uvedených postupů zde také bude ukázán postup při zpracování získaných velikostí zrn, tak aby mohl být definován výpočetní model v programu SYSWELD, umožňující predikci velikosti austenitického zrna v oblasti svaru, v tepelně ovlivněné oblasti, ale například také predikující změnu velikosti zrna po tepelném zpracování.

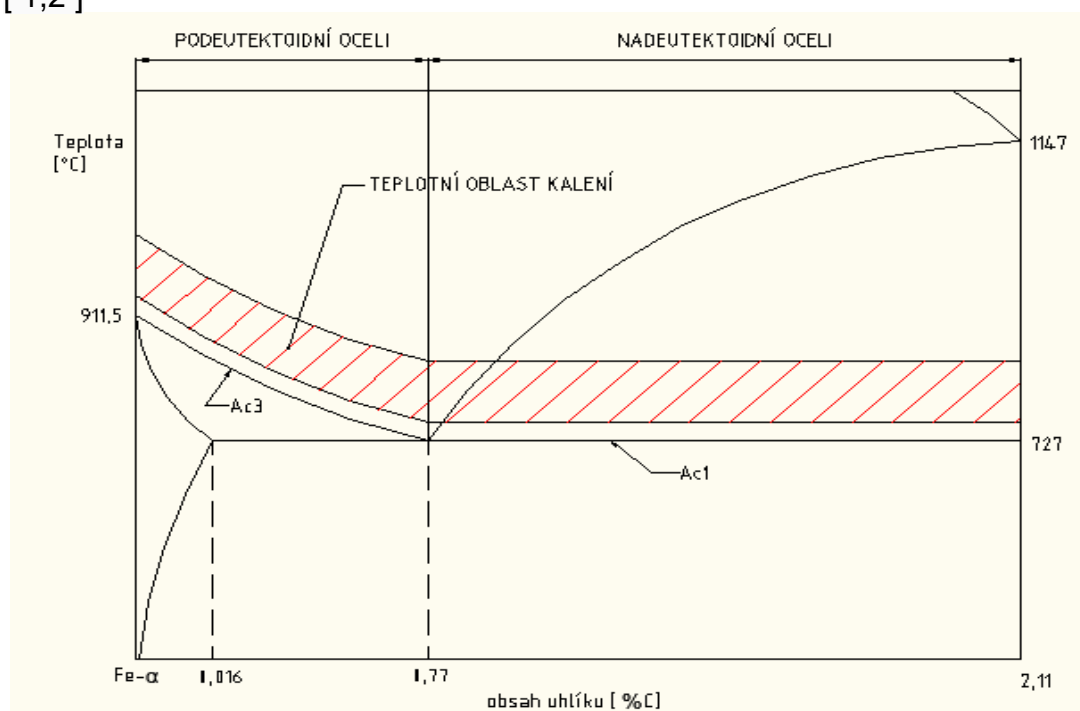
Bakalářská práce vznikla s podporou TA02010992.

2. Teoretická část

Teoretická část je přípravou na praktický experiment. Tato kapitola obsahuje teoretické poznatky tepelného zpracování, které souvisejí s fázovými přeměnami a zejména austenitickou strukturou ocelí – kalení, vnitřní struktura, růst austenitických zrn, vnitřní pnutí, kalicí prostředí, kalicí pece apod.

2.1 Teorie kalení

Kalení je ohřev předmětu na určitou teplotu, výdrž na této teplotě a následné ohlazení v kalicím prostředí. U podeutektoidních ocelí se pohybujeme nad teplotou A_{c3} přibližně 30 až 50°C, u eutektoidních ocelí a nadeutektoidních ocelí se kalicí teplota pohybuje přibližně 30 až 50°C nad teplotou A_{c1} (viz obr. 1). Při ochlazování dochází k přeměně austenitu na nerovnovážné struktury: martenzit, bainit, (popřípadě na rovnovážné struktury: lamelární nebo globulární perlit) v závislosti na rychlosti ochlazení. [1,2]



Obr. 1 Teplotní oblast kalení v rovnovážném diagramu Fe₃C

Podeutektoidní oceli – ocel s obsahem uhlíku do 0,77%

Eutektoidní oceli – ocel s obsahem uhlíku 0,77%C

Nadeutektoidní oceli – ocel s obsahem uhlíku nad 0,77%C

Teploty: $A_{c1} = 727^{\circ}\text{C}$, A_{c3} = funkční teplota, která se pohybuje od $911,5^{\circ}\text{C}$ do 727°C v závislosti na % obsahu uhlíku.

Austenit – tuhý intersticiální roztok uhlíku v železe γ - železo γ je v intervalu od $911,5^{\circ}\text{C}$ do 1392°C pro čisté železo.

Ferit - tuhý intersticiální roztok uhlíku v železe α -Fe- α = ferit - železo α je v intervalu od 0°C do $911,5^{\circ}\text{C}$ pro čisté železo.

Struktury – martenzit, bainit, lamelární a globulární perlit jsou definovány (viz 2.3).

Kalitelnost - schopnost dosáhnout nerovnovážného stavu-nerovnovážné struktury.

Prokalitelnost - schopnost se zakalit do určité hloubky.

Zakalitelnost - schopnost dosáhnout maximální tvrdosti po kalení, v závislosti na procentuálním obsahu uhlíku. [1,2,4,6]

2.2 Druhy kalení

Pomocí popsaných druhů kalení se snažíme dosáhnout zvýšení tvrdosti, oděru vzdornosti a zlepšení mechanických vlastností pro praktické využití dané součásti.

IRA – izotermický rozpad austenitu – rozpad za konstantní teploty

ARA – anizotermický rozpad austenitu – rozpad za proměnlivých teplot, různé rychlosti ochlazování [1, 4]

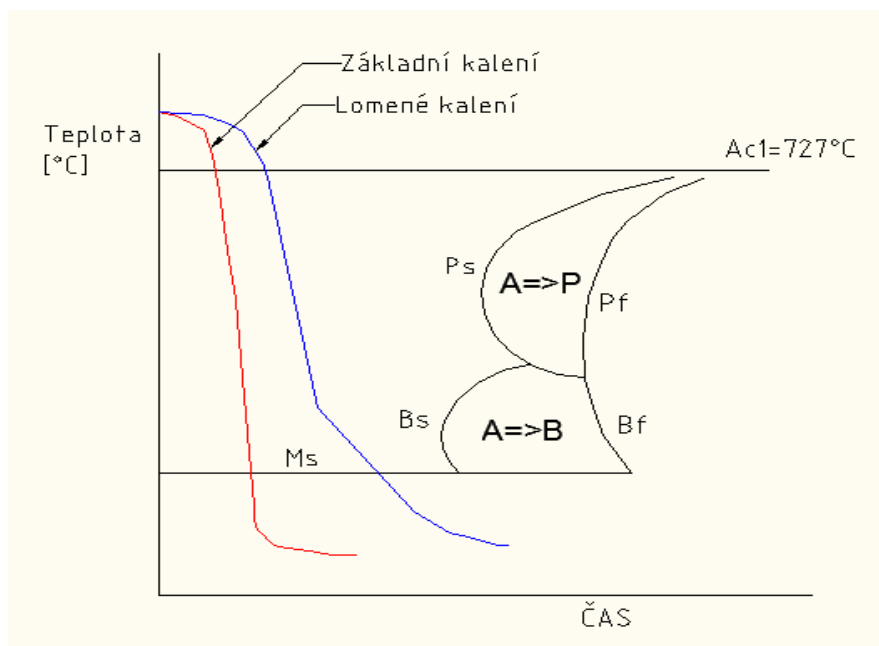
2.2.1 Anizotermická přeměna

Základní kalení:

Kalení (obr. 2) probíhá nepřerušovaně. Jako kalicí prostředí se zpravidla používá studená lázeň (voda, vodní roztoky, oleje). V kalené součásti (dále jen součást) dochází k nerovnoměrnému ochlazení a tím dochází k velkým pnutím mezi povrchem a jádrem součásti.

Lomené kalení:

U lomeného kalení dochází ke změně kalicího prostředí a tím i ke změně intenzity ochlazování, v dané fázové přeměně. Kombinací kalicího prostředí může být například voda x olej, olej x vzduch atd. podle požadované výsledné struktury.



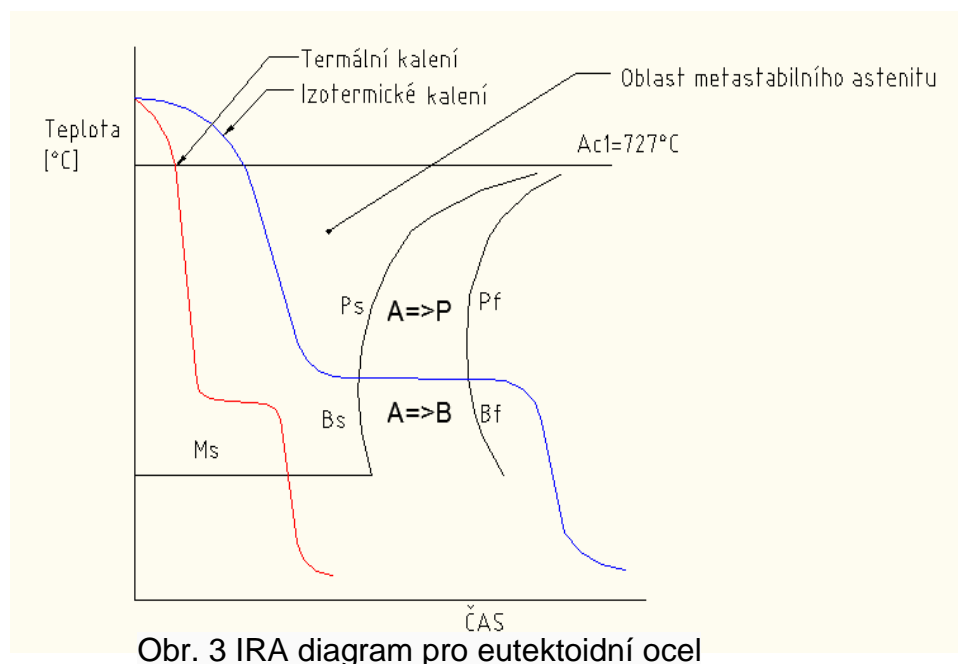
Obr. 2 ARA diagram pro eutektoidní ocel

2.2.2 Izotermická přeměna

Termální kalení: Průběh kalení je specifický svou časovou prodlevou (konstantní teplota) v oblasti metastabilního austenitu (obr. 3). Termální kalení se provádí z důvodu vyrovnání teplot jádra a povrchu součásti. Toto teplotní vyrovnání nám umožní podstatně snížit vnitřní pnutí. Prodleva se provádí v teplých lázních (2.5.4).

Izotermické kalení (Izotermické zušlechťování)

Postup a princip kalení je obdobný jako u výše uvedeného termálního kalení. Rozdíl mezi nimi je v časové prodlevě. U izotermického kalení je výdrž na teplotě v oblasti fázové přeměny austenitu na bainit (obr. 3) po celý čas přeměny.



Obr. 3 IRA diagram pro eutektoidní ocel

Metastabilní austenit se vyskytuje pod teplotou A_{c1} ($A_{c1}=727^{\circ}\text{C}$) při rychlém ochlazení. Poté vznikají nerovnovážné struktury – martenzitu popřípadě bainitu (viz 2.3). [1,2]

2.3 Struktury vzniklé při ochlazování

Tato kapitola rozebírá materiál z pohledu vnitřních struktur, které můžeme získat při tepelném zpracování ocelí.

2.3.1 Rovnovážné struktury

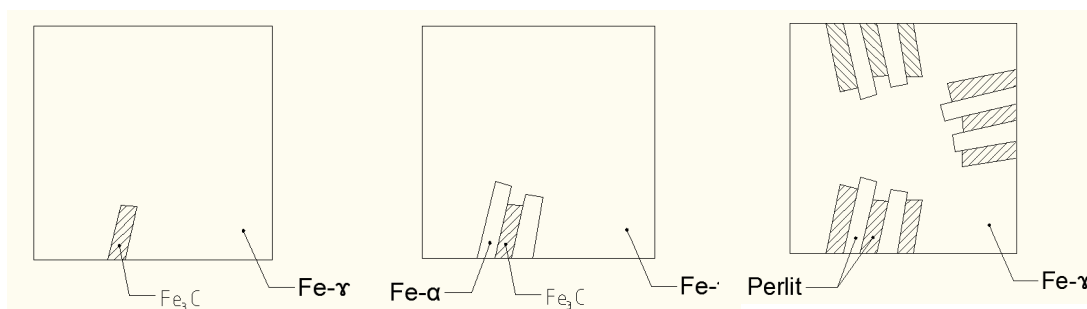
Vznikají za rovnovážných podmínek - malé rychlosti ochlazování. Uhlík má čas segregovat z austenitu v podobě karbidů železa.

Perlitická přeměna

Perlit vzniká při 650 až 550°C podle druhu materiálu. Perlitická přeměna vzniká za rovnovážných podmínek. Austenit se mění na perlit a cementit, hovoříme tedy, že perlit vzniká čistě difúzní přeměnou. Perlit je směs feritu a feritického cementitu. (obr. 4).

Lamelární perlit

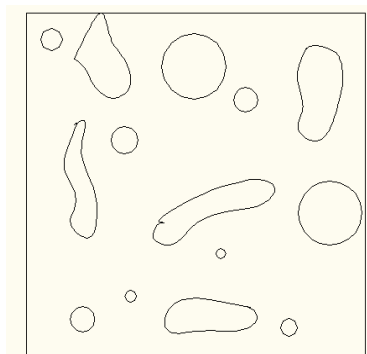
Vzniká na základě fázové přeměny železa γ na železo α . Průběh přeměny je takový: vznik karbidu železa Fe_3C , který odčerpá uhlík ze svého okolí. To umožní v místech se sníženým obsahem uhlíku vznik feritu (železa α). Takto se lamely cementitu a feritu střídají až do úplné přeměny austenitu na perlit. (obr. 4.).[1]



Obr. 4 Perlitická přeměna

Globulární perlit

Vzniká obdobně jako výše uvedený lamelární perlit. Rozdíl spočívá v tom, že karbid železa Fe_3C (lamely) se sbalí do kuliček - globulek (obr. 5). Sbalování lamel do kuliček je podmíněno časovou výdrží těsně pod teplotou $A_{c1}=727^\circ\text{C}$. [1]



Obr. 5 Globulární perlit

2.3.2 Nerovnovážné struktury

Vznikají za nerovnovážných podmínek, při velké rychlosti ochlazování. Uhlík nestihne segregovat z austenitu. Část se stačí vyloučit u bainitu po hranicích zrn ve formě karbidu železa Fe_3C . Zbytek zůstává v intersticiálních polohách. Dochází tedy k intersticiálnímu zpevnění.

Martenzit

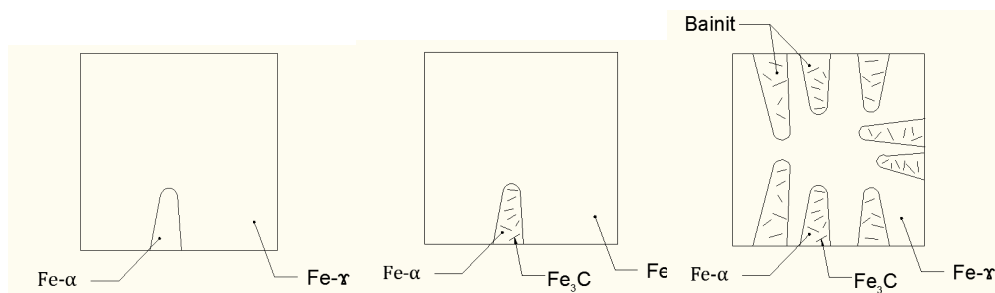
Martenzit vzniká při teplotách v intervalu 350 až 250°C podle druhu materiálu. Nerovnovážný, silně přesycený tuhý roztok uhlíku v železo α (viz kapitola 2.1, obr. 6). Struktura je tvořena velmi jemnými karbidy Fe_3C orientovanými ve směru martenzitických jehlic. [1] Vzniká na základě fázové přeměny železa γ na železo α za nerovnovážných podmínek. Přeměna probíhá bez difúzně, uhlík je rozpuštěn v martenzitu. Je umístěn v intersticiální poloze. Vysokou tvrdost tedy způsobují jemné karbidy Fe_3C a meziatomové zpevnění uhlíkem.



Obr. 6 Martenzit [6]

Bainit

Vzniká při 550 až 350°C podle druhu materiálu. Bainit je přesycený tuhý roztok uhlíku v železe α – nelamelární, firiticko - karbidická směs. Vzniká fázovou přeměnou, železa γ na železo α za nerovnovážných podmínek při ochlazování (obr. 7). Difúze probíhá pouze v intersticiální podobě. Uhlík se vylučuje v podobě jemných karbidů po hranicích zrn. Rozeznáváme tzv. horní a dolní bainit. V podstatě se liší velikostí karbidů.

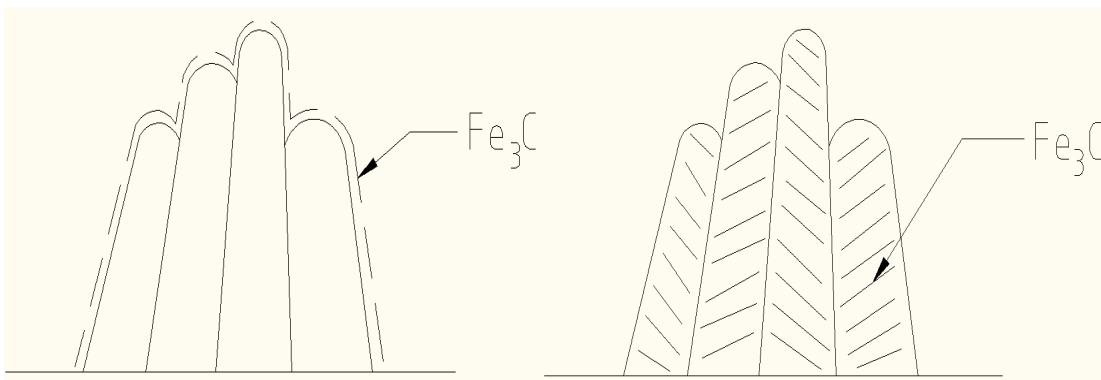


Obr. 7 Přeměna austenitu na bainit

Horní bainit (obr. 8) je tvořen svazky hrubých jehlic bainitického feritu a podél těchto jehlic (na povrchu) je vyloučen cementit Fe_3C .

Dolní bainit (obr. 9) je tvořen svazky tenkých desek bainitického feritu a jemnými karbidy cementitu Fe_3C umístěnými v určitých rovinách.

=> lze tedy prohlásit, čím jemnějších karbidů cementitu (Fe_3C) dosáhneme, tím získáme vyšší tvrdost a naopak. [1,2,6]



Obr.8 Horní bainit

Obr. 9 Dolní bainit

Fe – α , Fe – γ , Ferit, Austenit (viz 2.1)

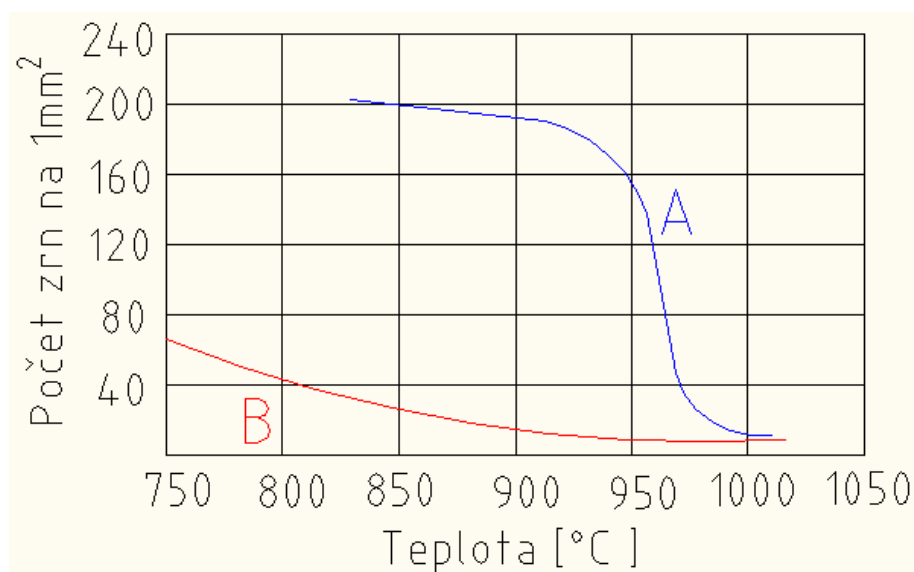
Fe_3C – cementit – karbid železa

Intersticiální poloha – meziatomová poloha [2]

2.3.3 Charakteristika a růst austenitického zrna

Výrazný růst austenitického zrna můžeme pozorovat při překročení kritické teploty. Kritická teplota pro hrubozrnné oceli je přibližně nad teplotou Ac_3 (viz 2.1). U jemnozrnných ocelí se kritická teplota pohybuje v rozmezí 900°C až 950°C (viz obr. 10). Rychlost růstu austenitického zrna závisí na teplotě a délce výdrže na dané teplotě. Jinými slovy čím doba teplotního náběhu a výdrže pece bude delší, tím bude zrno hrubší. A čím bude kratší čas náběhu pece na danou teplotu, tím vznikne více zárodků austenitických zrn. Dochází také ke srůstání jednotlivých austenitických zrn, v závislosti na čase. Pokud hovoříme o malé rychlosti náběhu pece, pohybujeme se okolo rychlosti cca 3 až $4^\circ\text{C}/\text{min}$. Také platí, čím ohříváme materiál na vyšší teplotu, tím získáme hrubší zrno. Při vysokých teplotách téměř až u křivky

solidu, dochází k difúzi kyslíku po hranicích zrn. Stav se označuje jako „Spálená ocel“. Tento jev má za příčinu úplnou ztrátu houževnatosti. Spálenou ocel již nelze žádným tepelným zpracováním regenerovat.



Obr.10 Počet zrn na ploše 1mm² v závislosti na teplotě

A u jemnozrnné oceli

B u hrubozrnné oceli

Legury

- jemnozrnné oceli – Al (hliník), Ti (titan) brzdí růst zrn do teploty okolo 950°C
- hrubozrnné oceli – Mn (mangan) napomáhá růstu zrn [4,8,11]

Oceli se smíšenou strukturou (hrubozrnnou a zároveň jemnozrnnou) jsou nežádoucí. Nemůžeme predikovat velikosti zrn ve výsledné struktuře a tím i mechanické vlastnosti ocelí.

Nejjemnější austenitická struktura vzniká rekrystalizací jemného zrnitého perlitu, lamelární perlit dává již zrno poněkud hrubší. [7] Čím je jemnější austenitické zrno, tím můžeme předpokládat lepší mechanické vlastnosti. Postup pro určení velikosti zrn popisuje norma: Česká státní norma ČSN EN ISO 643 Ocel – Mikrografické stanovení velikosti zrna.[5]

Srůstání austenitických zrn

Při růstu austenitických zrn dochází ke srůstání malých zrn, ve větší. Startovací silou růstu a srůstání zrn je vysoká povrchová energie (Gibbsova volná energie) po hranicích zrn. Srůstáním zrn se tato energie snižuje. Lze říci, že povrchová energie je funkcí velikosti zrn. Při rostoucích rozměrech zrn povrchová energie klesá. Potřebná povrchová energie při posouvání hranic zrn je přibližně stejná jako energie vyvolávající samo difúzi po hranicích zrn. Prvky s vysokou teplotou tání zabraňují srůstání (růstu) austenitických zrn (např.: Cr, Mo). Podobně se také chovají karbidy po hranicích zrn - nitridy, oxidy, sulfidy a další. Všechny tyto částice brání nejen mechanickému posunu hranic zrn, ale rovněž snižují povrchovou energii zrn. Po jejich rozpuštění se energie zvýší a dojde k rychlému růstu zrn. [10,11]

Pravidla růstu a srůstání zrn:

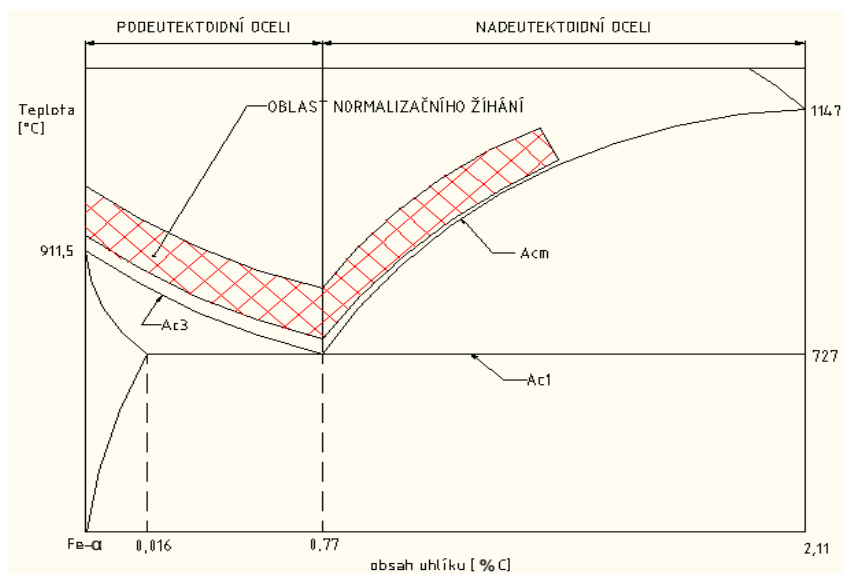
- a) Při růstu zrn dochází k pohybu hranic zrn.
- b) Pohyb hranice zrna je přerušovaný a směr pohybu se může náhle změnit.
- c) Zrno může růst do jiného na úkor jeho objemu.
- d) Míra spotřeby zrn na úkor jiných se často zvyšuje, když jsou zrna téměř spotřebována.
- e) Zakřivená hranice obvykle migruje ke svému středu křivosti.
- f) Pokud se hranice zrn jedné fáze setkávají v úhlech jiných než 120 stupňů, zrna s hranicí s ostrým úhlem se spotřebují tak, aby se úhel blížil 120 stupňům a došlo k srůstu.“ [10]

2.3.4 Zjemnění zrn

Z pravidla se používají dvě metody: normalizační žíhání a tepelně mechanické zpracování.

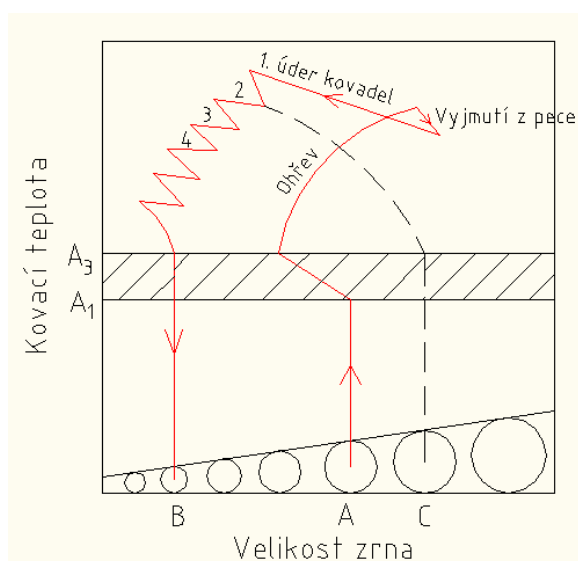
- a) normalizační žíhání: Tato metoda zjemňování zrna se provádí žíháním, u kterého dochází k fázové přeměně železa α na železo γ . (viz 2.1) Při normalizačním žíhání dochází k výraznému zjemnění zrna. Ohřev se provádí pro podeutektoidní oceli nad teplotu A_{C3} přibližně 30 až 50°C a u nadeutektoidních ocelí se provádí nad teplotu A_{cm} 30 až 50°C (obr. 11).

Následuje několikahodinová výdrž na teplotě a poté pozvolné ochlazování.
[1,4,6]



Obr. 11 Teplotní oblast normalizačního žhání v diagramu Fe-Fe₃C

b) tepelně-mechanickým zpracováním: metoda spočívá v rozbití velkých zrn pomocí ohřevu a poté intenzivním tvářením v oblasti austenitu (viz 2.1), (obr. 12). Ohřev musí být proveden do oblastí podobně jako normalizační žhání, poté dojde k intenzivnímu tváření, které zjemní strukturu (zrno). Původní struktura A (níže uvedená) se pomocí tvářen zjemní na strukturu B. Kdyby, nedošlo k intenzivnímu tváření, výsledná struktura B by byla hrubší než původní struktura A (patrně z obr. 12). [9]



Obr. 12 Tepelně-mechanické zpracování – kovací diagram [9]

Teploty: A_1 a A_3 (viz 2.1)

Velikost zrn

A – původní

B – po intenzivním tváření

C – bez intenzivního tváření

2.4 Vnitřní pnutí

Vnitřní pnutí vyvolává částečnou změnu tvaru součásti. Pnutí je v podstatě vnitřní síla, která působí uvnitř materiálu a vyvolává určitou deformaci. Pnutí odstartuje rozdílná teplota mezi jádrem a obalem (v závislosti na tepelné roztažnosti materiálu). Při kalení dochází k nebezpečné deformaci hned dvěma způsoby:

a) jedná se o fázovou přeměnu austenitu (viz 2.1) na martenzit (viz 2.3.2). Tedy k přeměně železa γ na železo α (viz 2.1). Při této fázové přeměně dochází k nezamezitelnému pnutí. S tímto strukturním pnutím je spojena i změna objemu součásti (nebezpečí pro přesně tolerované rozměry).

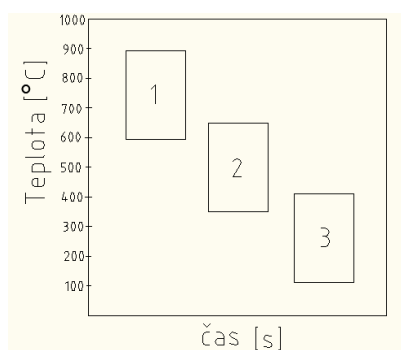
b) druhé nebezpečí deformací hrozí od rozdílné teploty mezi jádrem a obalem. Pnutí vyvolá tepelná roztažnost materiálu. Toto pnutí může být vyvoláno nesprávným ohřevem či špatným vnořením součásti do kalicího prostředí (viz 2.5). Pnutí může zapříčinit tvarovou deformaci součásti.

Pnutí můžeme snížit nízkoteplotním popouštěním. Nízkoteplotní popouštění je tepelné zpracování, při kterém se uvolňuje zbytkové pnutí a mizí křehkost. Materiál si zachovává vysokou tvrdost. Zpracování probíhá zpravidla hned po kalení. Popouštět můžeme ihned z kalicí teploty nebo pomocí nového ohřevu. Provádí se ohřevem na teplotu 100 až 300°C, výdrží na této teplotě v řádech hodin a následné pozvolné vychladnutí. [2,6]

2.5 Kalicí prostředí

Kalicí prostředí je prostředí, které součást ochladí tak, že získá požadovanou strukturu do určité hloubky. Rozeznáváme základní kalicí prostředí: voda, olej, vzduch, teplé lázně. S rostoucí teplotou se snižuje účinnost kalicího prostředí. Při kalení do vody nebo oleje dochází ke změně

skupenství (možný vznik parního polštáře na povrchu součásti a následnému snížení přestupu tepla). U kalení do vody, oleje dochází při ochlazování k třem údobím (obr. 13). Časy jednotlivých údobí lze zkrátit relativním pohybem prostředí. Kalení izotermické a izotermální (viz 2.1.2), (obr. 3) se provádí výdrží na určité teplotě. Zde se používají tzv. teplé lázně, (viz 2.5.4). Každé z těchto prostředí má svou specifickou intenzitu ochlazování a ochlazovací účinnost. Intenzita a účinnost ochlazování se mění v závislosti na kalicím prostředí. Aby bylo dosaženo požadovaných parametrů ochlazování, můžeme jednotlivá prostředí kombinovat. Dosáhneme tedy požadovaný tvar, ochlazovací křivky (viz obr. 2, obr. 3).[1,2,6]

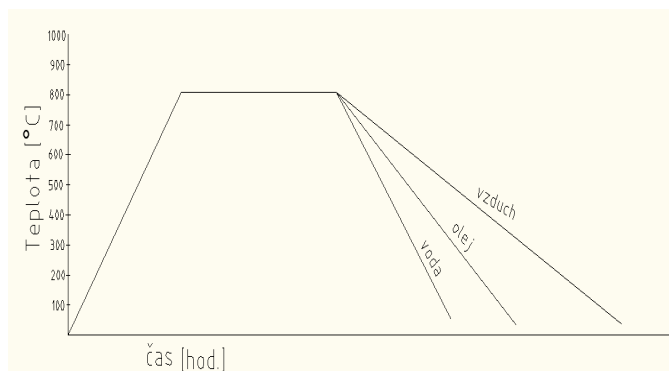


Obr. 13 Jednotlivá údobí ochlazování

- 1) vytvoření parního polštáře
- 2) vznik bublinkového varu
- 3) přestup tepla vedením a prouděním

Intenzita kalení – vyjadřuje rozdíl mezi teplotou povrchu a teplotou jádra

Účinnost kalicího prostředí – vyjadřuje rychlost odebrání tepla z kalené součásti[6]



Obr. 14 Rychlost odebrání tepla z kalené součásti

2.5.1 Kalicí prostředí – voda (H_2O)

Teplota ochlazovacího média by se měla pohybovat přibližně okolo 20 až 30°C. Vyšší teplota cca nad 40°C se udává jako škodlivá. Vysoká ochlazovací účinnost je v oblasti bainitické a martenzitické přeměny (viz 2.3). Běžně tedy do vody kalíme uhlíkové a nízko-legované oceli. Do tohoto média lze také přidat některé přísady, které brání vzniku parního polštáře a mění ochlazovací účinnost, intenzitu.

Výhody vody jako kalicího prostředí jsou zřejmé. Velice nízká pořizovací cena, medium nezatěžuje životní prostředí a není agresivní k obsluze daného zařízení.

Nevýhody vody – její korozní účinek, nelze použít na všechny typy ocelí (musíme brát ohled na vnitřní pnutí ocelí).(viz 2.4) [4,6]

2.5.2 Kalicí prostředí – olej

Pracovní teplota kalicího media se pohybuje přibližně od 25 do 70°C, pokud se nejedná o teplou lázeň (viz 2.5.4). Oproti kalení do vody jsou zde mnohem menší ochlazovací rychlosti a s tím spojená i menší vnitřní pnutí. Účinnost ochlazování se v závislosti na teplotě velice výrazně mění. Ke kalení lze použít oleje na přírodní bázi nebo syntetické. Do oleje můžeme kalit nízko a středně legované oceli. Popřípadě tenkostěnné součásti z uhlíkových ocelí.

Výhody olejového kalicího prostředí: Lze kalit více druhů ocelí. Nemají korozní účinek a většinou nedochází k popraskání vlivem vnitřního pnutí.

Nevýhody olejového kalicího prostředí: ekologická zátěž pokud se jedná o syntetické oleje, vyšší pořizovací cena, filtrace a čištění olejové lázně. Při kalení může dojít za vyšších teplot ke vzplanutí. Dále nepříliš zdravé prostředí.[4,6]

2.5.3 Kalicí prostředí – vzduch

Vzduch jako kalicí prostředí je nejmírnější ochlazovací médium. Teplota vzduchu se bere jako teplota okolního prostředí. Ochlazování je plynulé a lze urychlit prouděním vzduchu nebo přidáním mlhoviny (vody, oleje). Prostředí se hodí na vysokolegované oceli – samozakalitelné oceli.

Výhody kalicího prostředí: rovnoměrné ochlazování, dále malé vnitřní pnutí v materiálu.

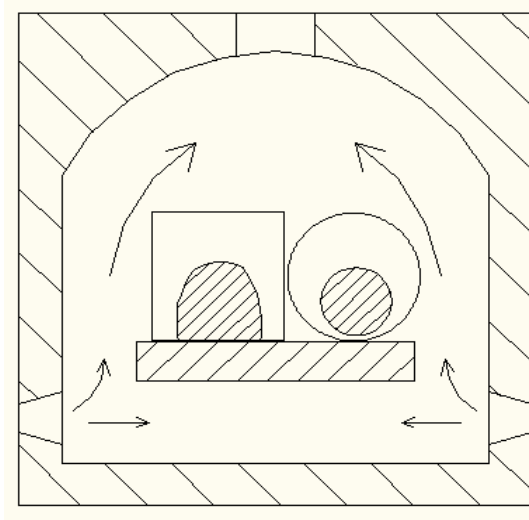
Nevýhody kalicího prostředí: dochází k oxidaci povrchu, nelze použít pro všechny typy ocelí.[4,6]

2.5.4 Kalicí prostředí – teplé lázně

Teplé lázně jsou speciální kalicí prostředí pro izotermické a izotermální kalení (viz 2.1.2). Účelem kalicího prostředí není určitou rychlostí snížit teplotu až na teplotu okolí. Teplá lázeň je ohřátá na určitou teplotu, na které dochází k fázové přeměně za konstantní teploty (obr. 3). Přeměna se řídí podle IRA diagramu. Množství přeměněného austenitu (viz 2.1) na nerovnovážné struktury (viz 2.3.2) se řídí podle času výdrže na dané teplotě. Druhy teplých lázní: taveniny solí, slitiny olova a cínu, oleje (do 200°C).[4,6]

2.6 Ohřev

Ohřev je jeden z dílčích procesů při kalení. Při ohřevu dosáhne kalený materiál požadované teploty. Za ohřevu dochází k oduhličení a oxidaci povrchu (mimo ohřev ve vakuových pecích). Hrozí také nebezpečí deformací při vnášení tepla do materiálu. Dochází k mírnému pnutí, u ohřívané součásti není teplota v celém objemu homogenní (obr. 15). Ohříváním dochází k vizuálním změnám povrchu. Můžeme pozorovat změny barev v závislosti na teplotě.



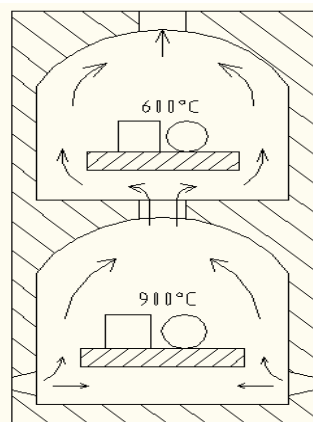
Obr. 15 Profil postupného prohřívání kaleného materiálu

2.6.1 Komorová pec

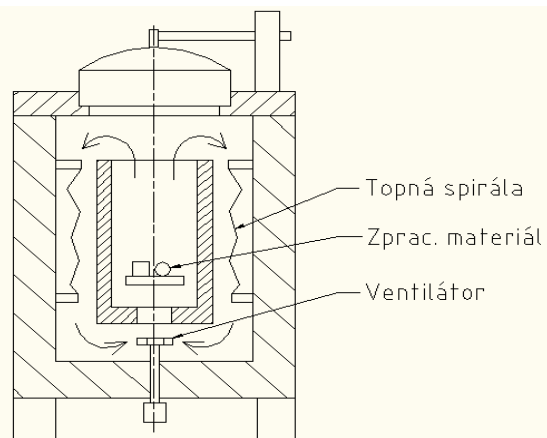
Komorová pec je horizontální pec. Bývá vyzděna šamotovými cihlami a na podlaze je navíc položen žáruvzdorný plech (z důvodu možného opotřebení šamotu při manipulaci se vkládanými součástmi). Vytápění pece může být dvojího druhu: plynové hořáky nebo elektrická topná tělesa. Komorová pec může být i dvoukomorová (obr. 16). V první části pece se ohřívá součást na požadovanou kalící teplotu a v druhé části se z odcházejícího zbytkového tepla předehřívá další součást. [2]

2.6.2 Šachtová pec

Šachtová pec (obr. 17) je pec vertikální s válcovitým tvarem komory. Tyto pece mohou být často umístěny i pod úroveň podlahy. K ohřívání se používají plynové trysky popřípadě elektrické spirály doplněné o ventilátor (z důvodu homogenity teploty v celém objemu komory pece). Z důvodu velikosti šachtové pece a s ohledem na vynaloženou energii na ohřev této pece se převážně používá pro kalení velkých součástí. [2]



Obr. 16 Komorová pec



Obr. 17 Šachtová pec

2.6.3 Vakuová pec

Jde o složité zařízení dvoukomorové vakuové pece. První komora slouží pro ohřátí součásti, druhá komora se skládá z kalícího prostředí a dochází v ní k ochlazení materiálu. Jako ochlazovací medium se používá silikonový olej (viz 2.5.2) a ochranná atmosféra (dusík – přetlak, přetlak 2MPa). Po celou dobu tepelného zpracování se součást zpracovává bez přístupu vzduchu. Nedochozí tedy k oxidaci. Pec je plně automatizována.[6]

3 Praktická část bakalářské práce

Praktická část bakalářské práce navazuje na část teoretickou. Zabývá se vlastním experimentem, stanovením velikostí austenitických zrn, vyhodnocením a porovnáním dosažených výsledků. Veškeré experimenty byly provedeny v laboratořích Technické univerzity v Liberci – Katedra Strojírenské technologie. Výpočty velikosti austenitického zrna jsou provedeny podle normy ČSN EN ISO 643.

3.1 Materiál zkoumaných vzorků

Materiál zkoumaných vzorků HR3C je materiál určený pro tepelně namáhané součásti v energetickém průmyslu. Je vyráběn nadnárodní firmou Nippon Steel Sumitomo Metal Corporation. Jedná se o austenitickou ocel vyvinutou pro konstrukci zařízení, kde dochází k výraznému creepovému namáhání materiálu. Ocel HR3C je zařazena do oblasti žárupevných materiálů, ze kterých se vyrábějí například žárupevné trubky u kotlů tepelných elektráren (dále jenom elektráren), nebo tepelně exponované výměníky u elektráren a tepláren. Tento materiál byl vyvinut za účelem zlepšení účinnosti výše zmíněných energetických zařízení z důvodu finančních úspor i z důvodu ochrany životního prostředí.

Materiál HR3C patří na základě svého chemického složení mezi austenitické oceli. Pomocí spektrální analýzy bylo zjištěno následující chemické složení, (tab. 1).

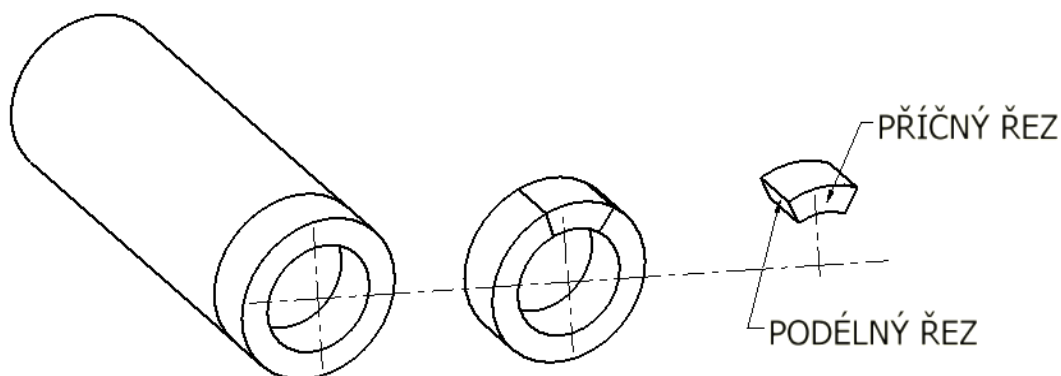
Tabulka 1 - chemické složení oceli HR3C

Prvek	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Nb	N
Podíl prvků [%]	0,093	0,62	1,46	0,0053	0,009	24,62	19,42	0,41	0,23

Materiál HR3C má také výraznou odolnost proti vysokoteplotní oxidaci. Ani při maximální zkoumané teplotě (1100°C) a ani při maximální výdrži (8 hodin) nedošlo k žádné viditelné oxidaci na povrchu.

Materiál dodaný pro experimenty byl ve formě válcované trubky průměru 38 mm a tloušťkou stěny 6mm. Protože se jedná o trubku tvářenou

intenzivně v jednom směru, mohou být zrna ve směru tváření deformována, což se může projevit na výsledné velikosti zrna. Proto byly vzorky vyhodnoceny ve dvou na sebe kolmých řezech (obr. 17). Z trubky bylo nařezáno 5 prstenců v délce 12mm. Jeden z nich byl vyhodnocen v příčném a podélném směru před tepelným exponováním vzorků, aby mohla být stanovena počáteční velikost zrna. Zbylé vzorky byly dále zpracovány.



Obr. 17 Příprava metalografických vzorků

Z důvodu věrohodnosti numerické simulace v programu SYSWELD je nezbytné použít pro teoretické výpočty při simulaci skutečné naměřené hodnoty. V plánu experimentu byly zvoleny dvě hodnoty teplotní expozice, vzorků s různou časovou prodlevou vzorku. Díky tomu lze dosáhnout rozdílných velikostí zrn ve vzorcích. Jak je uvedeno v následujícím textu a v tabulce 2, vzorky byly tepelně exponovány při dvou různých teplotách a dvou různých výdržích na teplotě.

Charakteristika tepelné expozice vzorků:

- Tepelně nezpracovaný materiál – v základním stavu
- Vzorek tepelně zpracovaný při teplotě 1000°C a výdrži na této teplotě 4 hodiny
- Vzorek tepelně zpracovaný při teplotě 1000°C a výdrži na této teplotě 8 hodiny
- Vzorek tepelně zpracovaný při teplotě 1100°C a výdrži na této teplotě 4 hodiny
- Vzorek tepelně zpracovaný při teplotě 1100°C a výdrži na této teplotě 8 hodiny

Tabulka 2 označení vzorků

Označení vzorku	Řez [Příčný x Podélný]	Příloha	Teplota [°C]	Výdrž na teplotě [hod.]
HR3C-Základní stav-Př	Př	Příloha 1	0	0
HR3C-Základní stav-Po	Po	Příloha 2	0	0
HR3C-1000C-4h-Př	Př	Příloha 3	1000	4
HR3C-1000C-4h-Po	Po	Příloha 4	1000	4
HR3C-1000C-8h-Př	Př	viz obr. 19, 20	1000	8
HR3C-1000C-8h-Po	Po	Příloha 5	1000	8
HR3C-1100C-4h-Př	Př	Příloha 6	1100	4
HR3C-1100C-4h-Po	Po	Příloha 7	1100	4
HR3C-1100C-8h-Př	Př	Příloha 8	1100	8
HR3C-1100C-8h-Po	Po	Příloha 9	1100	8

3.2 Postup měření

Praktická část bakalářské práce byla provedena v laboratořích Technické univerzity v Liberci – KSP. Veškeré potřebné vybavení pro přípravu metalografických vzorků poskytla pro vykonání bakalářské práce výše zmíněná katedra Strojírenské technologie.

Výše uvedené vzorky ve tvaru prstenců byly tepelně zpracovány v elektrické odporové peci s řízenou regulací teploty a rychlostí ohřevu. Jednotlivé vzorky o rozměrech: průměr 38, tloušťky 6 a délky 12mm (viz obr. 17). Vzorky byly odděleny stanoveným způsobem z dodané trubky pomocí metalografické brusky. Rychlost ohřevu na požadovanou teplotu byla 7°C/min. Zvolené teploty expozice byly 1000°C a 1100°C a výdrže na teplotě pak 4 a 8 hodin. Následné ochlazení bylo provedeno do vody. Takto rychlé ochlazení bylo zvoleno z důvodu zamezení další možné změny velikosti zrna při pomalém ochlazování.

Takto zhotovené vzorky byly podrobeny metalografickému zpracování a následnému leptání na zviditelnění velikosti zrna. Pro naleptání povrchu bylo použito leptadlo složené z: 80mlHCl; 13ml HF; 7ml HNO₃.

Toto poměrně agresivní leptadlo naleptalo odolnou ocel HR 3 C po hranicích zrn. Běžně používaná leptadla pro leptání austenitických ocelí zde nebyla účinná.

3.3 Určení velikosti austenitických zrn

Naleptané vzorky byly nasnímány na optickém mikroskopu Neochot 21 pomocí připojené digitální kamery Nikon Digital Sighn. Snímky byly zhotoveny s takovým zvětšením, aby bylo možno z důvodu přesnosti zaručit v hodnocené ploše alespoň 50 zrn. Dle zadání byly k vyhodnocení použity (dle normy ČSN EN ISO 643) dvě metody sloužící k určení velikosti austenitického zrna. Jednalo se o metodu Lineární průsečíkovou a metodu Planimetrickou.

a) Lineární průsečíková metoda

U Lineární průsečíkové metody se určuje velikost zrn pomocí úsečky a počtu zrn, která do úsečky zasahují. Dojde k sečtení všech zrn na úsečce a pomocí známé délky úsečky, při známém zvětšení získáme průměrný počet úseků N_L . Z důvodu možné deformace zrn v jednom směru jsou k vyhodnocení použity 3 úsečky, z nichž každá je orientována v jiném směru (viz obr. 18). Pomocí tabulky 3, se přiřadí hodnota definující příslušnou velikost zrna. Výhodou této metody je vysoká rychlost dosažení požadovaného výsledku, nevýhodou je menší přesnost například oproti Planimetrické metodě.

Délku úseček je možné zvolit libovolně. Pravidlem je zde pouze snaha o protnutí co největšího počtu zrn v definovaném plošném útvaru. Pro případ tohoto vyhodnocení, byla délka horizontální úsečky na fotografii $L_x = 250\text{mm}$, vertikální úsečka na fotografii $L_y = 160\text{mm}$, úsečka pod úhlem 45° na fotografii měří $L_z = 210\text{mm}$ (obr. 18).

K přepočtu úseček použitých na fotografii vůči skutečnému měřítku a skutečné délce na vzorku byl použit vzorec (1). Kde X je změřená délka nakreslené úsečky, rozměr A je velikost měřítka na fotografii a rozměr B je skutečný rozměr měřítka na fotce v [mm].

$$L = \frac{X [\text{mm}] \cdot A [\text{mm}]}{B [\text{mm}]} \quad [\text{mm}] \quad (1)$$

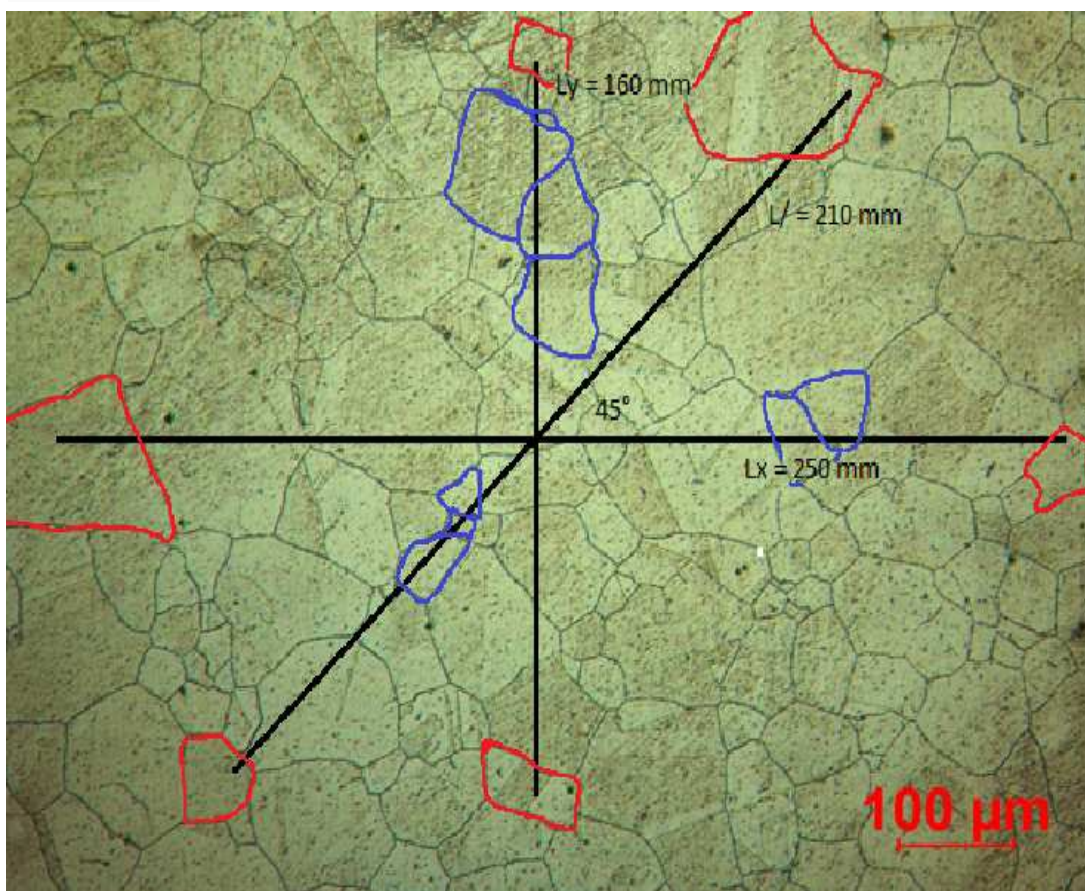
Kde:

X - délka nakreslené úsečky [mm]

A - velikost měřítka na fotografii (A = 0,1 mm)

B - skutečný rozměr měřítka na fotce v [mm]

Skutečné rozměry úseček na vzorku: horizontální úsečky na vzorku byla $L_x = 0,893$ mm, vertikální úsečka $L_y = 0,571$ mm, úsečka pod úhlem 45° $L_l = 0,750$ mm.



Obr. 18 vzorek HR3C-1000C-8h-Př

Celkový počet zrn protnutý úsečkou je stanoven podle vzorce (2)

$$N = n_1 + n_2 + n_3 \quad [-] \quad (2)$$

n_1 – prochází-li úsečka celým zrnem, počítáme zrno jako 1, (modrá zrna)

n_2 – prochází-li úsečka po hranici zrn, počítáme zrno jako 0,5

n_3 – koncové a počáteční zrno se počítá jako 0,5, (červeně označená zrna),
pokud začíná, nebo končí uvnitř zrna

Součet zrn na úsečce:

N_A – počet zrn na úsečce L_x

N_B – počet zrn na úsečce L_y

N_C – počet zrn na úsečce L_z

Průměrný počet úseků na 1mm měřené úsečky (počet zrn na jednotlivých úsečkách)

$$\text{Horizontální počet úseků} \quad N_x = \frac{N_A}{L_x} \quad [\text{mm}^{-1}] \quad (3)$$

$$\text{Vertikální počet úseků} \quad N_y = \frac{N_B}{L_y} \quad [\text{mm}^{-1}] \quad (4)$$

$$\text{Pod uhem } 45^\circ \text{ počet úseků} \quad N_z = \frac{N_C}{L_z} \quad [\text{mm}^{-1}] \quad (5)$$

Průměrný počet úseků na milimetr měřící úsečky, vzorec (6).

$$\bar{N}_L = \sqrt[3]{N_x + N_y + N_z} \quad [\text{mm}^{-1}] \quad (6)$$

Na základě tohoto údaje je možné pomocí tabulky 3 získat - střední průměr zrna D , střední plochu zrna \bar{a} , po případě velikost zrna G .

Průměrná délka jednotlivých úseků je pak určena na základě vzorce (7)

$$l = \frac{1}{\bar{N}_L} \quad [\text{mm}] \quad (7)$$

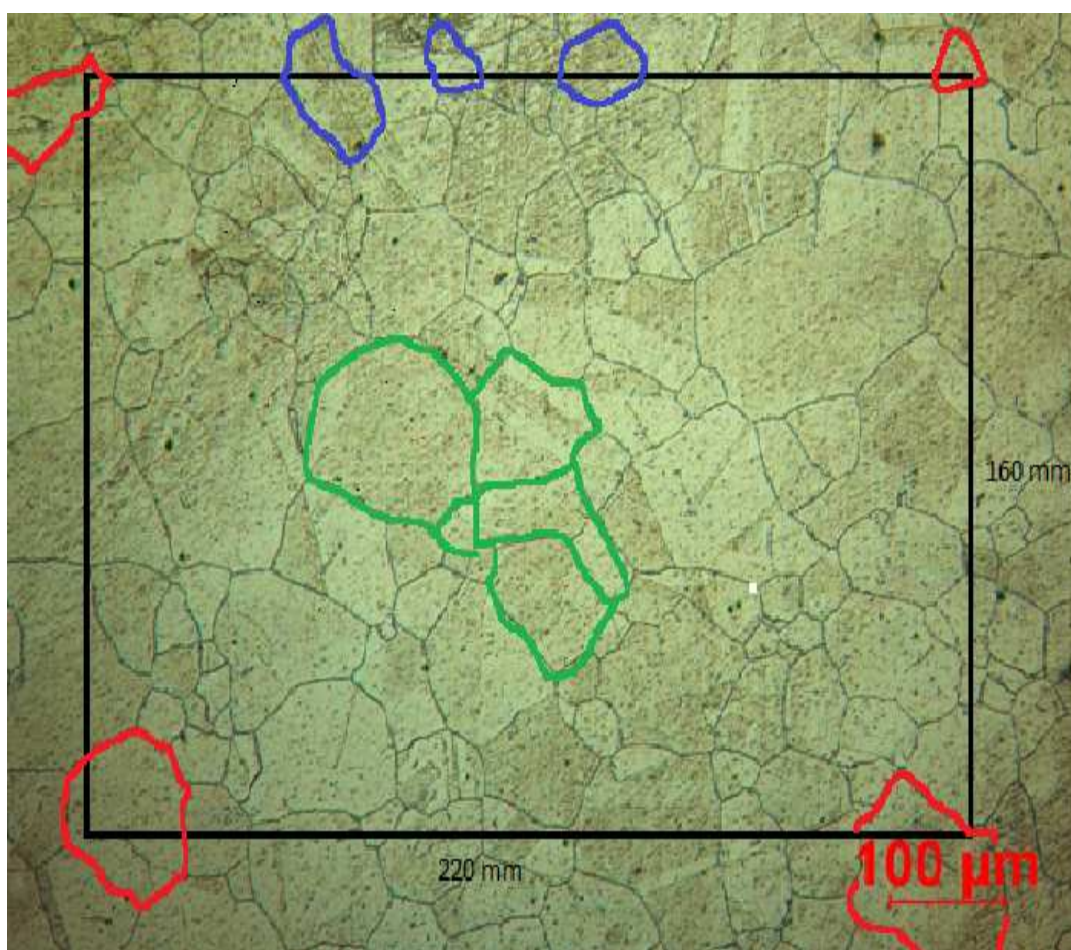
Tabulka 3 Hodnocení velikostí zrn

Číslo velikosti zrna G	Počet zrn na milimetr čtvereční			Střední průměr zrna	Střední plocha zrna	Průměrná délka zachyceného úseku	Průměrný počet úseků na milimetr měřicí úsečky
	Jmenovitá hodnota	<i>m</i> Mezní hodnota (vyjma)	Hodnoty do (včetně)	<i>d</i> mm	<i>a</i> mm ²	<i>l</i> mm	<i>N_L</i> mm ⁻¹
-7	0,062 5	0,046	0,092	4	16	3,577	0,279
-6	0,125	0,092	0,185	2,828	8	2,529	0,395
-5	0,25	0,185	0,37	2	4	1,788	0,559
-4	0,50	0,37	0,75	1,414	2	1,265	0,790
-3	1	0,75	1,5	1	1	0,894	1,118
-2	2	1,5	3	0,707	0,5	0,632	1,582
-1(00)	4	3	6	0,500	0,25	0,447	2,237
0	8	6	12	0,354	0,125	0,320	3,125
1	16	12	24	0,250	0,062 5	0,226	4,42
2	32	24	48	0,177	0,031 2	0,160	6,25
3	64	48	96	0,125	0,015 6	0,113	8,84
4	128	96	192	0,088 4	0,007 81	0,080	12,5
5	256	192	384	0,062 5	0,00390	0,056 6	17,7
6	512	384	768	0,044 2	0,001 95	0,040 0	25,0
7	1 024	768	1 536	0,031 2	0,000 98	0,028 3	35,4
8	2 048	1 536	3 072	0,022 1	0,000 49	0,020 0	50,0
9	4 096	3 072	6 144	0,015 6	0,000 244	0,014,1	70,7
10	8 192	6 144	12 288	0,011 0	0,000 122	0,010 0	100
11	16 384	12 288	24 576	0,007 8	0,000 061	0,007 07	141
12	32 768	24 576	49 152	0,005 5	0,000 030	0,005 00	200
13	65 536	49 152	98 304	0,003 9	0,000 015	0,003 54	283
14	131 072	98 304	196 608	0,002 8	0,000 007 5	0,002 50	400
15	262 144	196 608	393 216	0,002 0	0,000 003 7	0,001 70	588
16	524 288	393 216	786 432	0,001 4	0,000 001 9	0,001 20	833
17	1 048 576	786 432	1 572 864	0,001 0	0,000 000 95	0,000 87	1 149
POZNÁMKA Tato tabulka uvádí hodnoty mezi různými parametry rovnoosých zrn.							

b) Planimetrická metoda

U Planimetrické metody se určuje velikost zrn pomocí uzavřeného obrazce a počtu zrn uvnitř a po okrajích. Dle normy by měl být minimální počet zrn v obrazci 50. Jako obrazec dle zadání byl použit obdélník o rozměrech 160 x 220mm (definovaná oblast na fotografii obr. 19). Střední počet zrn vypočítáme pomocí sumy všech zrn určených v obrazci a jejich podělením plochou obrazce.

Z tohoto údaje můžeme přímo matematicky určit střední průměr zrna. Nemusí se zde použít na určení středního průměru zrna tabulka 3. Díky tomu mají tyto údaje pro numerické simulace mnohem větší vypovídající hodnotu. Výhodou této metody je větší přesnost a vypovídací schopnost než například u Lineární metody. Nevýhodou je naopak značná pracnost a časová náročnost potřebná k dosažení požadovaného výsledku.



Obr. 19 vzorek HR3C-1000C-8h-Př

K přepočtu obdélníku použitého na fotografii měřítkem na skutečnou velikost na vzorku byl použit vzorec (1).

Velikost skutečného obdélníku na vzorku byla $785,7\mu\text{m} \times 571,4\mu\text{m}$.

Plocha obdélníku: $S = 785,7 \times 571,4 = 448\,971\mu\text{m}^2 = 0,449\text{ mm}^2$

n_{100} - celkový počet rovnocenných zrn v definované oblasti vzorec (8)

$$n_{100} = n_1 + 0,5n_2 + \frac{1}{4}n_3 \quad [\text{ks}] \quad (8)$$

Kde:

n_1 - počet zrn uvnitř obdélníku (zeleně), počítáme jako celé zrno [ks]

n_2 - počet zrn protnutých hranicí obdélníku (modře), počítáme jako půl zrna [ks]

n_3 - rohová zrna (červená). Každé zrno se počítá jako 1/4, to znamená že celkový součet je roven 1 (viz vzorec 8).

m – střední počet zrn na milimetr čtverečný vzorec (9)

$$m = \frac{n_{100}}{S} \quad [\text{mm}^{-2}] \quad (9)$$

=>ze středního počtu zrn lze přiřadit dle tabulky 3 – střední průměr zrna.

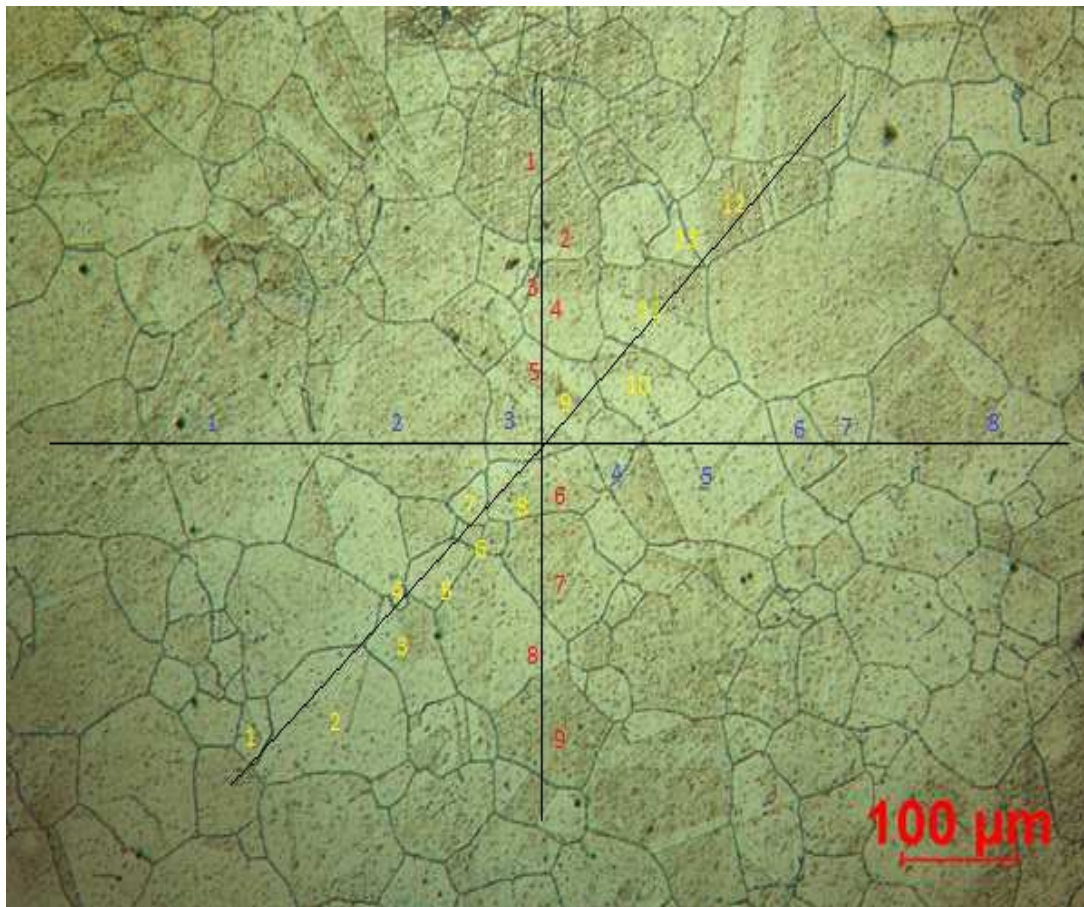
Střední průměr zrna lze přímo vypočítat dle normy (ČSN EN ISO 643) podle vzorce(10)

$$d = \frac{1}{\sqrt{m}} \quad [\text{mm}] \quad (10)$$

Příklad vyhodnocení vzorku HR3C-1000C-8h-Př

Postup výpočtu velikosti austenitických zrn je prezentován na vzorku HR3C-1000C-8h-Př. Výsledky zbývajících vzorků jsou zpracovány a uvedeny níže v tabulce 4.

Vyhodnocení pomocí Lineární průsečíkové metody



Obr. 20 Způsob vyhodnocení velikosti zrna - lineární průsečíková metoda
(1000C-8h-Př)

Počet zrn dle vzorce (2)

$$N = n_1 + n_2 + n_3$$

$$N_A = 9 \text{ ks}; \quad N_B = 10 \text{ ks}; \quad N_C = 14 \text{ ks}$$

Průměrný počet úseků dle vzorců (3, 4, 5)

$$N_x = \frac{N_A}{L_x} = \frac{9}{0,893} = 10,08 \text{ mm}^{-1}$$

$$N_y = \frac{N_B}{L_y} = \frac{9}{0,571} = 17,51 \text{ mm}^{-1}$$

$$N_l = \frac{N_C}{L_l} = \frac{9}{0,750} = 18,67 \text{ mm}^{-1}$$

Průměrný počet úseků na milimetr měřicí úsečky dle vzorce (6)

$$\overline{N}_L = \sqrt[3]{N_X + N_Y + N_Z} = \underline{14,88 \text{ mm}^{-1}}$$

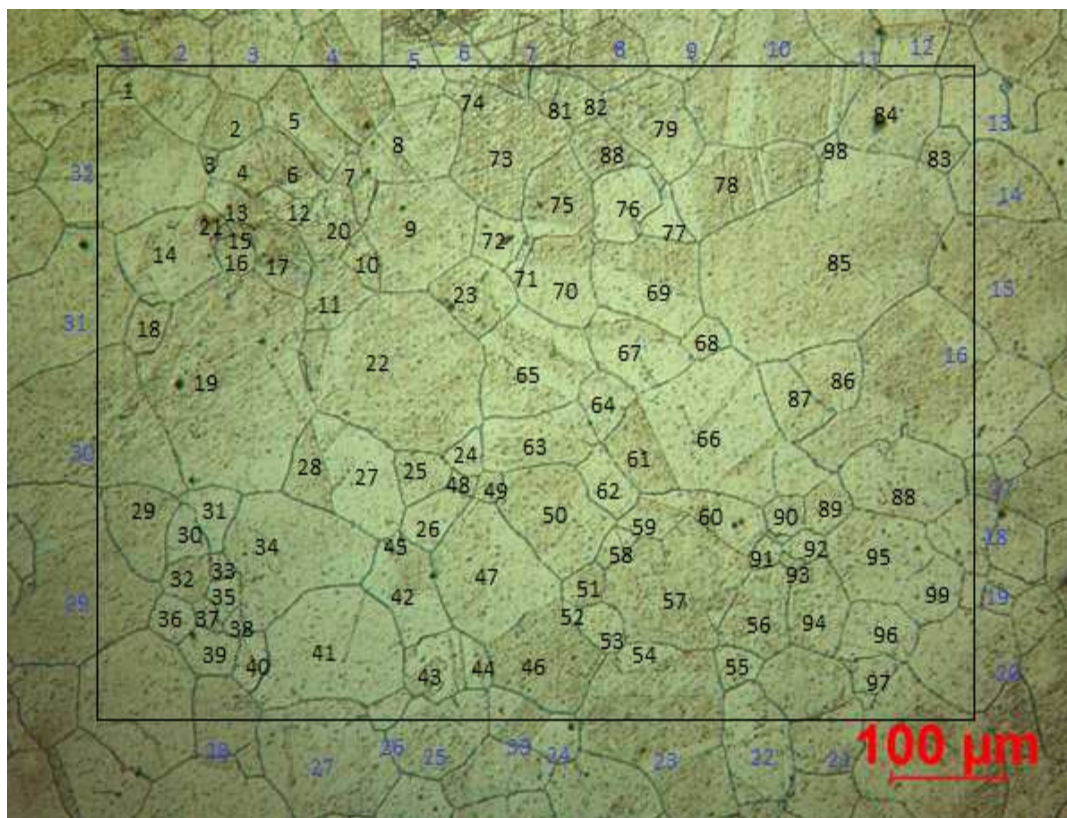
=> střední průměr zrna z tab. 3 $d = \underline{0,0625 \text{ až } 0,0884 \text{ mm}}$

=> velikost zrna dle tab. 3 $G = 4 \text{ až } 5 [-]$

Průměrná délka jednotlivých úseků dle vzorce (7)

$$l = \frac{1}{\overline{N}_L} = \frac{1}{14,88} = \underline{0,0672 \text{ mm}}$$

Vyhodnocení pomocí Planimetrické metody



Obr. 21 Způsob vyhodnocení velikosti zrna Planimetrickou metodou
(1000C-8h-Př)

Počet zrn:

$n_1 = 99 \text{ ks}; n_2 = 33 \text{ ks}; n_3 = 4 \text{ ks}$

Celkový počet zrn v definované oblasti – vzorec (8)

$$n_{100} = n_1 + 0,5n_2 + \frac{1}{4}n_3 = 99 + 0,5 \cdot 33 + 1 = 117[\text{ks}]$$

střední počet zrn na milimetr čtverečný vzorec (9)

$$m = \frac{n_{100}}{S} = \frac{117}{0,449} = \underline{260 [\text{mm}^{-2}]}$$

=> velikost zrna dle tab. 3 přiřadíme velikost zrna $G = 5 [-]$

Střední průměr zrna vzorec (10)

$$d = \frac{1}{\sqrt{m}} = \frac{1}{\sqrt{260}} = \underline{0,07042 [\text{mm}]}$$

Tabulka 4 Určené hodnoty velikosti austenitických zrn

Material HR 3 C			Lineární průsečiková metoda			Planimetrická metoda			Střední průměr zrna Lineární metoda (dle tabulky 3) \bar{d} [mm]	Střední průměr zrna Planimetrická metoda \bar{d} [mm]	Střední průměr zrna (průměrná hodnota Po, Př) počítané Planimetrickou metodou \bar{d} [mm]
			Průměrný počet úseků na milimetr měřicí čáry N_L [1/mm]	Číslo velikosti zrna G [-]	Průměrná délka zachyceného úseku l [mm]	Počet zrn na milimetr čtvereční m [mm ²]	Číslo velikosti zrna G [-]	Střední plocha zrna \bar{a} [mm ²]			
Základní stav	Podélný řez	HR3C-Základní stav-Po	12,873	4	0,07768	174,8	4	0,00572	0,0884	0,07563	0,07459
	Příčný řez	HR3C-Základní stav-Př	12,871	4	0,07771	184,9	4	0,00541	0,0884	0,07355	
1000°C, 4 hod.	Podélný řez	HR3C-1000C-4h-Po	13,608	4 až 5	0,07349	210,9	5	0,00474	0,0625	0,06885	0,06795
	Příčný řez	HR3C-1000C-4h-Př	14,952	5	0,6688	222,4	5	0,0045	0,0625	0,06705	
1000°C, 8 hod.	Podélný řez	HR3C-1000C-8h-Po	14,952	5	0,06689	181,5	4	0,00551	0,0625	0,07422	0,07232
	Příčný řez	HR3C-1000C-8h-Př	13,444	4 až 5	0,07438	201,6	5	0,00496	0,0625	0,07042	
1100°C, 4 hod.	Podélný řez	HR3C-1100C-4h-Po	10,261	4	0,09746	130,4	4	0,00767	0,0884	0,08757	0,08801
	Příčný řez	HR3C-1100C-4h-Př	10,401	4	0,09615	127,8	4	0,00782	0,0884	0,08844	
1100°C, 8 hod.	Podélný řez	HR3C-1100C-8h-Po	14,597	5	0,06861	145,7	4	0,00686	0,0625	0,08284	0,08609
	Příčný řez	HR3C-1100C-8h-Př	14,202	5	0,07041	125,3	4	0,00798	0,0625	0,08933	

3.4 Numerická simulace – program SYSWELD

Program SYSWELD je simulačním programem pracujícím na základě MKP. Jedná se o program pro simulace svařování a tepelného zpracování ocelí. Tento program se zabývá mimo jiné také predikcí velikosti zrn u svařovaných konstrukčních celků. Pro věrohodnost výsledků získaných pomocí numerických simulací jsou rozhodující skutečné naměřené vstupní hodnoty získané pomocí experimentálních měření metalografických vzorků.

Jedinou neznámou tak zůstává hodnota aktivační energie Q . Tato hodnota je závislá na teplotě a s rostoucí teplotou se mění. Problémem je, že v programu Sysweld je možné pro výpočet velikosti zrna zadat pro příslušný materiál pouze jednu hodnotu aktivační energie. Tendencí je proto optimalizovat tuto hodnotu aktivační energie tak, aby byl pokryt co největší rozsah numerických výpočtů (simulací).

Výpočet velikosti zrna v simulačním programu SYSWELD se provádí na základě rovnice (11). Do této rovnice dosazujeme, postupně různé hodnoty aktivační energie Q . Její hodnota rozhoduje o míře přiblížení vypočtených hodnot v programu vzhledem k reálným velikostem zrn (viz obr. 22, 23). Při znalosti velikosti austenitických zrn můžeme predikovat mechanické vlastnosti dané součásti. [10]

$$\dot{D}^a = C \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (11)$$

kde:

D – velikost zrna (mm)

T – absolutní teplota (K)

Q – aktivační energie ($\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$), (viz. 2.3.3)

R – plynová konstanta ($R = 8314 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$) [10]

a – je kladná konstanta, která vyjadřuje difúzi, srážky zrn – konstanta se pohybuje v intervalu 2 až 5, v programu se obvykle používá $a = 4$

C – materiálová konstanta ($\text{mm}^a \cdot \text{s}$) z dlouhodobého pozorování se používá pro oceli $C = 0,4948 \cdot 10^{14} \text{ mm}^4 \text{s}^{-1}$

Pro použití v programu se musí tvar rovnice (11) upravit:

$$\dot{D}^a = C \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right)$$

$$\int_{D_1}^{D_2} dD^a = C \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \int_{t_1}^{t_2} dt$$

$$D_2^a - D_1^a = C \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) (t_2 - t_1)$$

$$D_2^a = C \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) (t_2 - t_1) + D_1^a \quad (12)$$

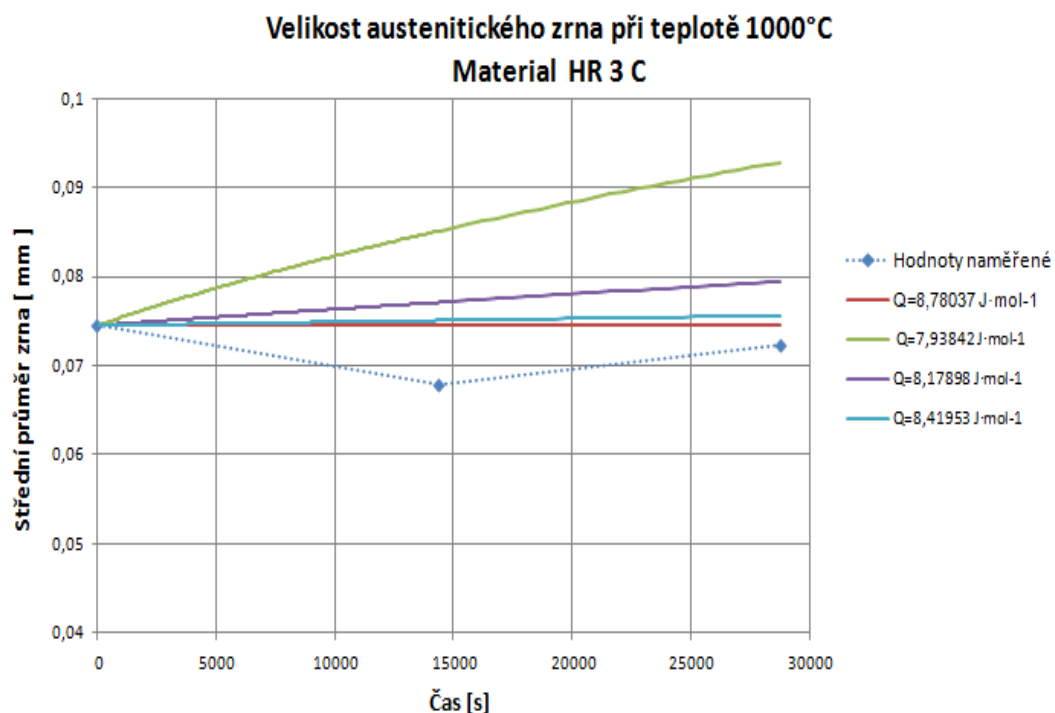
Takto upravenou rovnici lze použít pro výpočet velikosti austenitického zrna v programu SYSWELD. Závisí na velikosti časového intervalu a velikosti zrna na začátku časového intervalu (Index: 1 předchozí stav, 2 následující stav v časovém rozmezí).

Grafické znázornění

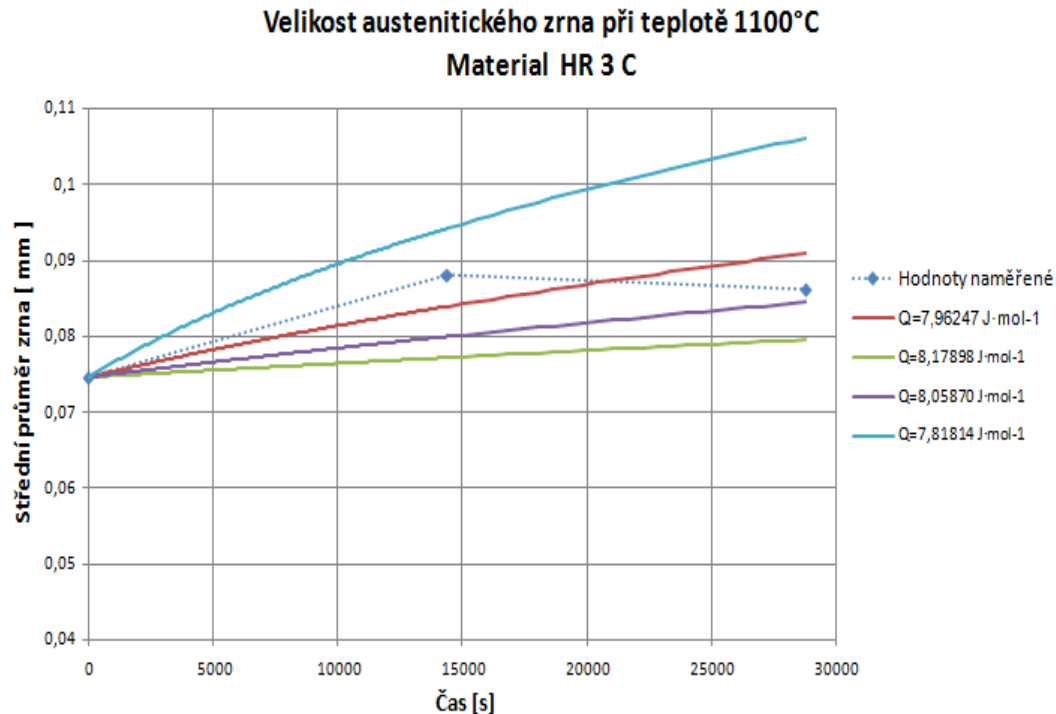
Na obrázku 22, 23 se porovnávají naměřené hodnoty velikostí austenitických zrn s vypočtenými hodnotami dosazenými do výpočtové rovnice v programu SYSWELD. V obrázku jsou z naměřených hodnot (podélného a příčného směru) vytvořeny aritmetické průměry (viz tab. 4).

Na obrázcích jsou znázorněny křivky pro různé aktivační energie Q . Lze pozorovat při změně aktivační energie Q různé proložení křivek. U nejlépe proložené křivky se odečte hodnota aktivační energie, a ta je pak použita pro ohraničení rozsahu hodnot aktivačních energií, ze kterých je volena výsledná hodnota Q pro výpočty v programu SYSWELD.

Výpočet v programu SYSWELD se zajišťuje pomocí rovnice (12). Pro potřeby bakalářské práce byl pro výpočet a grafické znázornění použit program Microsoft Office Excel 2007.



Obr. 22 Velikost aktivační energie pro program SYSWELD materiál HR 3 C za teploty 1000°C je $Q=8,78037[\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}]$.



Obr. 23 Velikost aktivační energie pro program SYSWELD materiál HR 3 C za teploty 1100°C je $Q=7,96247[\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}]$.

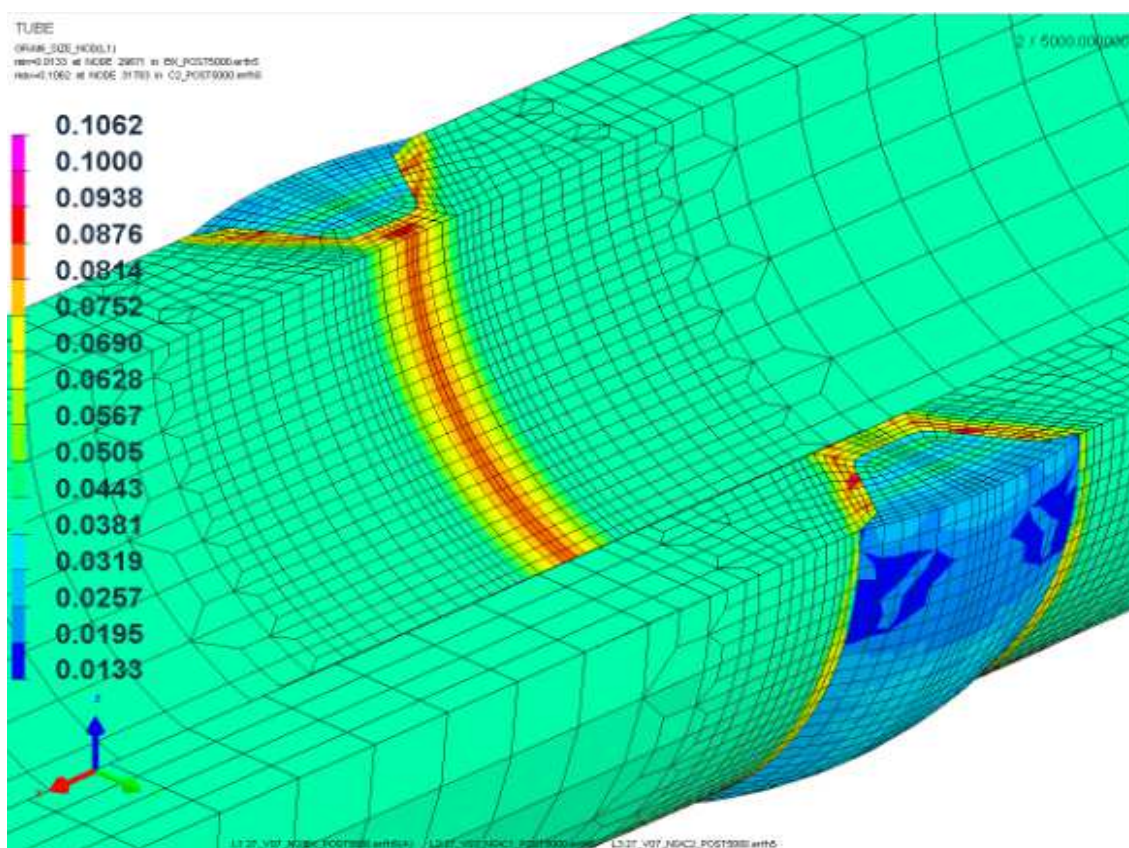
4 Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo ukázat postup při stanovení velikosti austenitického zrna a při aplikaci získaných dat pro simulační výpočty. Postup vyhodnocení byl proveden podle normy ČSN EN ISO 643 dle zadání Lineární průsečíkovou a Planimetrickou metodou. Pro experimentální činnost byl použit austenitický materiál HR3C. Výsledky experimentální části (vyhodnocení velikosti zrna oběma metodami) jsou uspořádány v tabulce 4. Na základě získaných výsledků, byly tyto údaje aplikovány v simulačním programu SYSWELD. Tento program používá k predikci velikosti zrna výpočet dle rovnice 12. Jak bylo u vzorce 12 popsáno, v případě růstu zrn pomocí precipitace a difúze podél hranic zrn (což je nejčastější případ) je jedinou neznámou hodnota aktivační energie, potřebná k růstu zrn.

V současné době se v rámci řešení grantového projektu TAČR TA02010992 hledá způsob měření této aktivační energie. Doposud byla hodnota aktivační energie stanovována nepřímou metodou pomocí simulačních výpočtů. Problémem zde je také fakt, že hodnota aktivační energie je závislá na teplotě a s rostoucí teplotou se mění. Proto je snaha o optimalizaci výsledné hodnoty aktivační energie tak, aby pokryla co možná nejširší spektrum numerických výpočtů. V rámci projektu TAČR je také snaha o modifikaci stávajícího výpočetního modulu tak, aby mohly být hodnoty aktivační energie při výpočtu zadávány ve formě teplotní závislosti.

Z výsledků reálných experimentů je také zřejmé, že materiál HR3C má velice dobrou žárupevnost. Při zkušební teplotě 1000°C a výdrži na teplotě 8h, nedošlo vůbec k žádnému zhrubnutí zrna. Teprve při teplotě 1100°C dochází k částečnému růstu zrna. Avšak i tento růst je velmi malý a velikost zrna se zde pohybuje v rozmezí tříd 4 a 5 dle normy ČSN EN ISO 643. Na obrázku 24 je ukázán výsledek simulačního výpočtu, velikosti zrna u vícevrstvého svaru provedeného poloautomatickou metodou TIG. Tento výpočet byl proveden firmou Mecas ESI na základě vstupních dat zjištěných v rámci této bakalářské práce. Jednotlivé housenky byly simulovány podle skutečně provedených a monitorovaných svarů.

Z výsledků simulace je zřejmé, že k největšímu zhrubnutí zrna došlo v oblasti svarového kovu a v tepelně ovlivněné oblasti. Výsledky získané simulací budou v rámci dalších prací ověřeny vyhodnocením velikosti zrna u skutečných svarů z materiálu HR3C.



Obr. 24 Výsledek numerické simulace vytvořené na základě dodaných údajů o velikosti austenitického zrna a o hodnotě aktivační energie

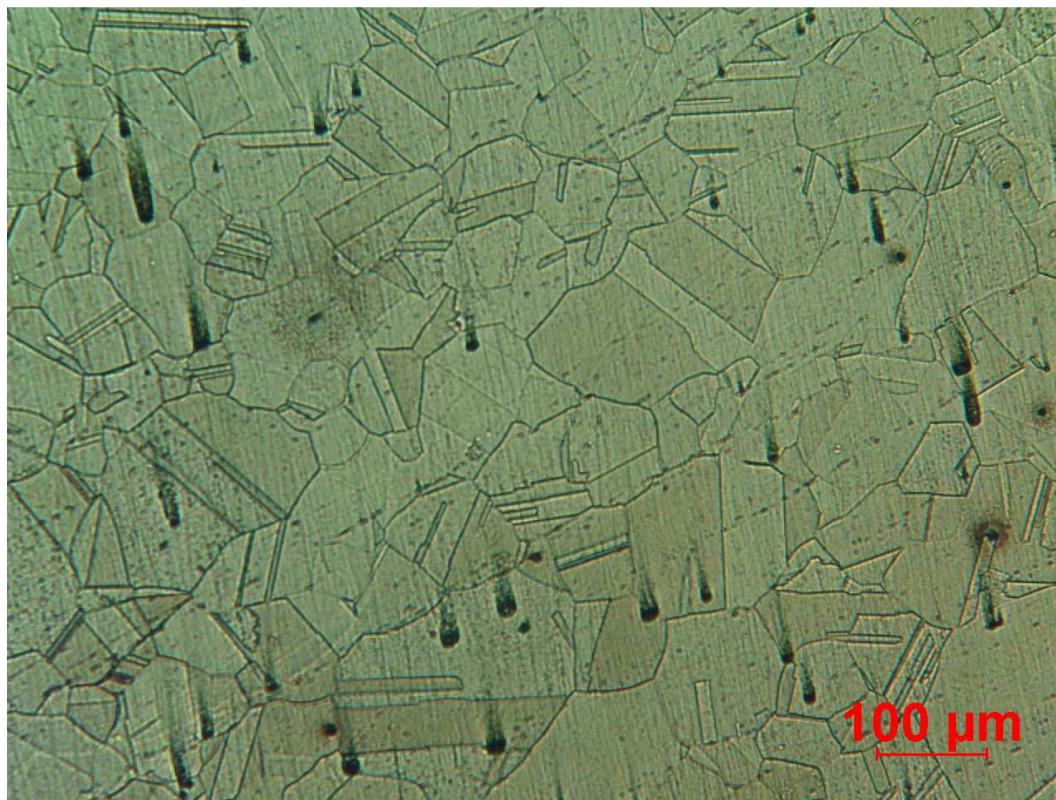
5 Seznam použité literatury

- [1] JECH, Jaroslav. *Tepelné zpracování ocelí: Metalografická příručka*. Praha: SNTL, 1977.
- [2] KORECKÝ, Jan. *Kalení ocelí*. Praha: Nakladatelstvo Roh - Práce, 1951.
- [3] NOVÁ, Iva, NOVÁKOVÁ Iva a BRADÁČ Jiří. *Technologie 1: Slévárenství, Svařování*. Liberec: TUL, 2006. ISBN 80-7372-052-3
- [4] PLUHAŘ, Jaromír. *Nauka o materiálech*. Praha: SNTL, 1966.
- [5] WOZNIAK, Jan. ČSN EN 643. *Ocel – Mikrografické stanovení velikosti zrn*. Praha: Český normalizační institut, 2003.
- [6] HOTAŘ, Adam. *Přednášky - Tepelné zpracování a zkoušení materiálu*. Liberec: TUL, 2013.
- [7] RYŠ, Přemysl a CENEK Mojmír. *Nauka o materiálech 1*. Praha: ČSAV, 1957.
- [8] DAĐOUREK, Karel. *Přednášky - Teorie tepelného zpracování*. Liberec: TUL, 2007.
- [9] LENFELD, Petr. *Technologie 2 - část 1*. Liberec: TUL, 2009. ISBN 978-80-7372-467-2
- [10] MORACEC, Jaroslav, NEUMANN Heinz, BRADÁČ Josef a NOVÁKOVÁ Iva. *Predikce velikosti zrna u oceli p92 pomocí numerických simulací*. Brno: Metal, 2013.
- [11] ŽÍDEK, Milan a BRADÁČ Josef. *Metalurgická tváritelnost oceli za tepla a za studena*. Praha: Aleko, 1995. ISBN 80-85341-45-X

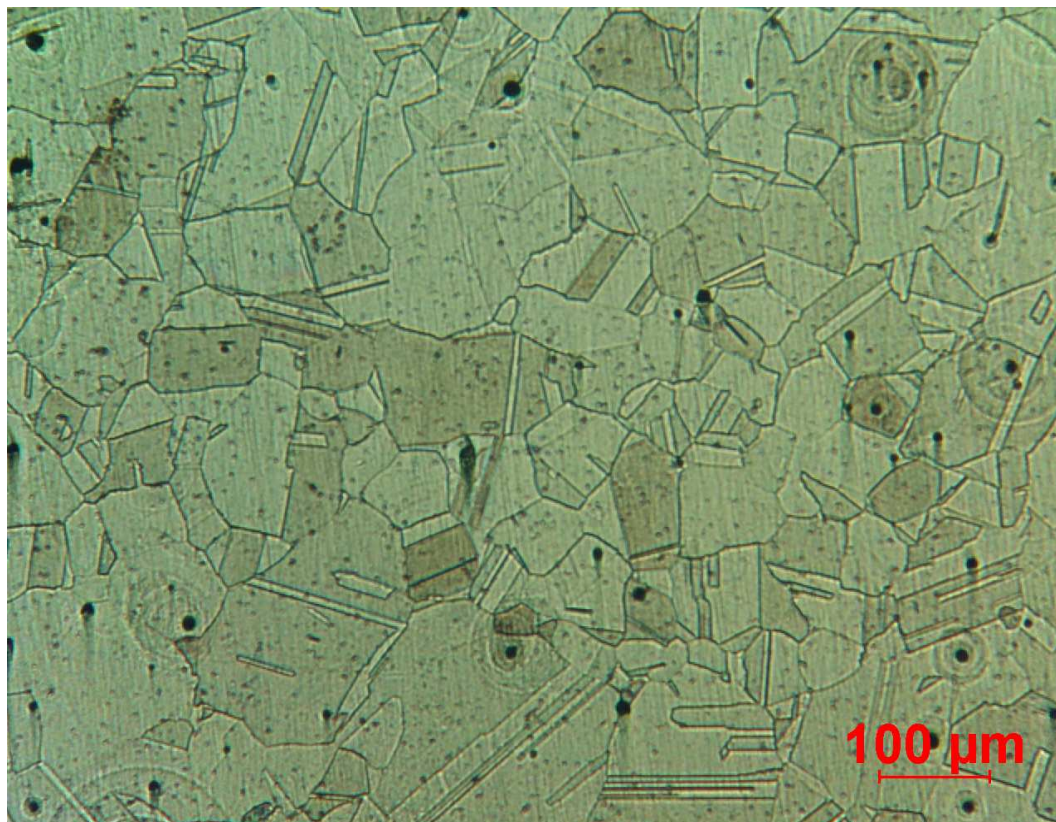
6 Obsah příloh

Příloha 1 - HR3C-Základní stav-Př.....	39
Příloha 2 - HR3C-Základní stav-Po.....	39
Příloha 3 - HR3C-1000C-4h-Př.....	40
Příloha 4 - HR3C-1000C-4h-Po.....	40
Příloha 5 - HR3C-1000C-8h-Po.....	41
Příloha 6 - HR3C-1100C-4h-Př.....	41
Příloha 7 - HR3C-1100C-4h-Po.....	42
Příloha 8 - HR3C-1100C-8h-Př.....	42
Příloha 9 - HR3C-1100C-8h-Po.....	43

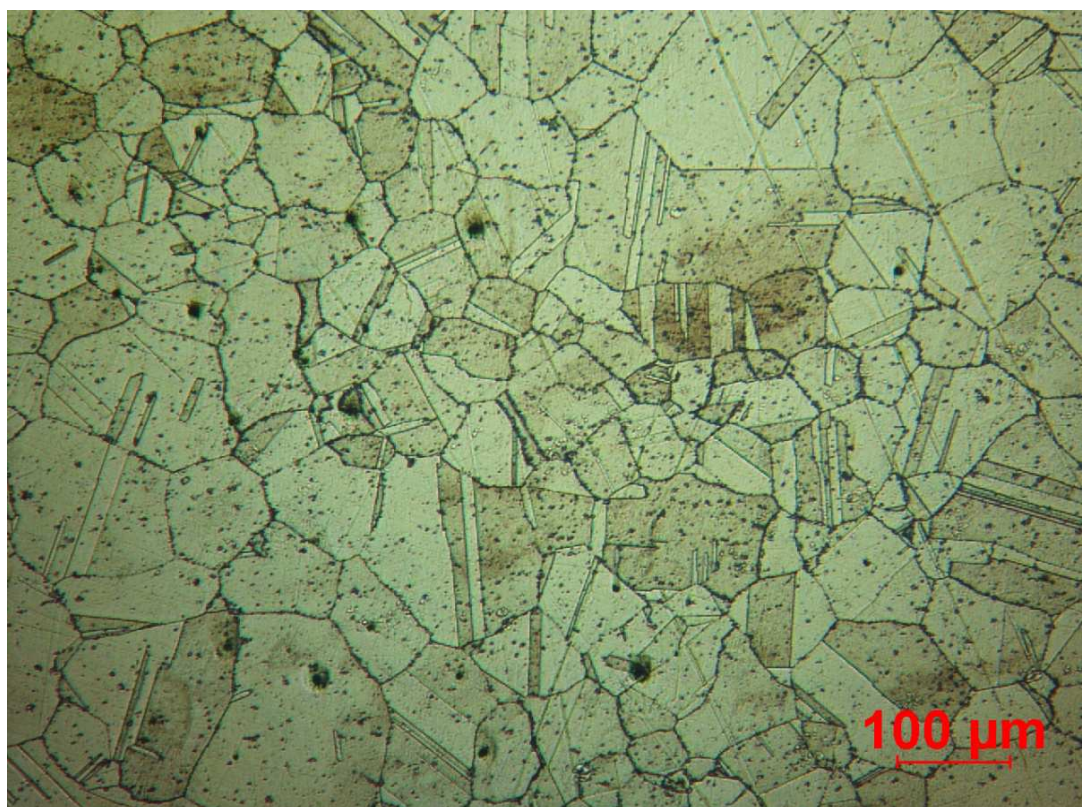
Příloha 1 - HR3C-Základní stav-Př



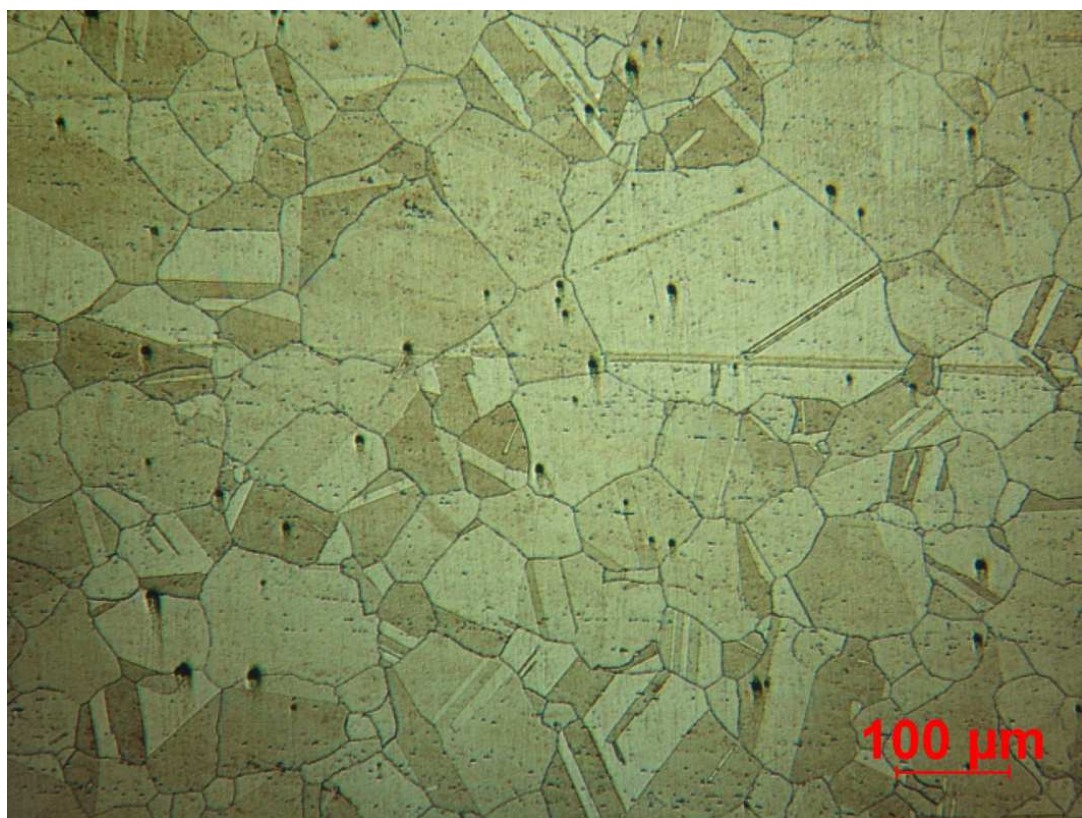
Příloha 2 - HR3C-Základní stav-Po



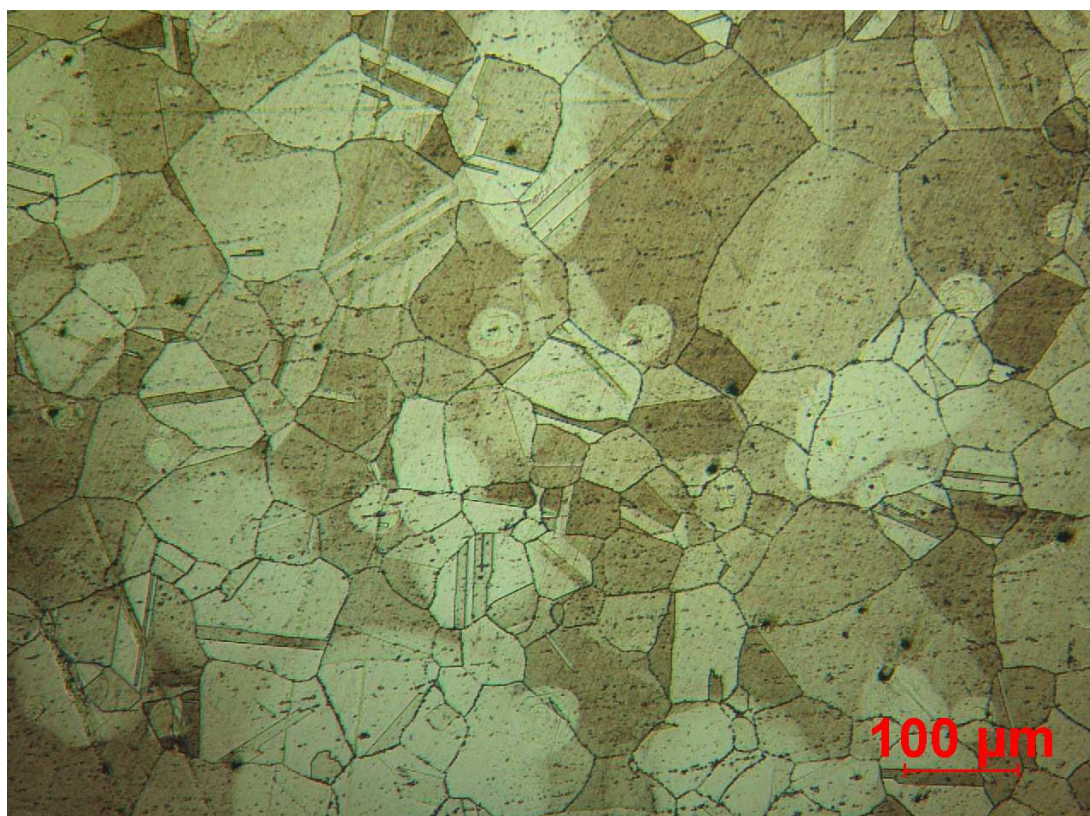
Příloha 3 - HR3C-1000C-4h-Př



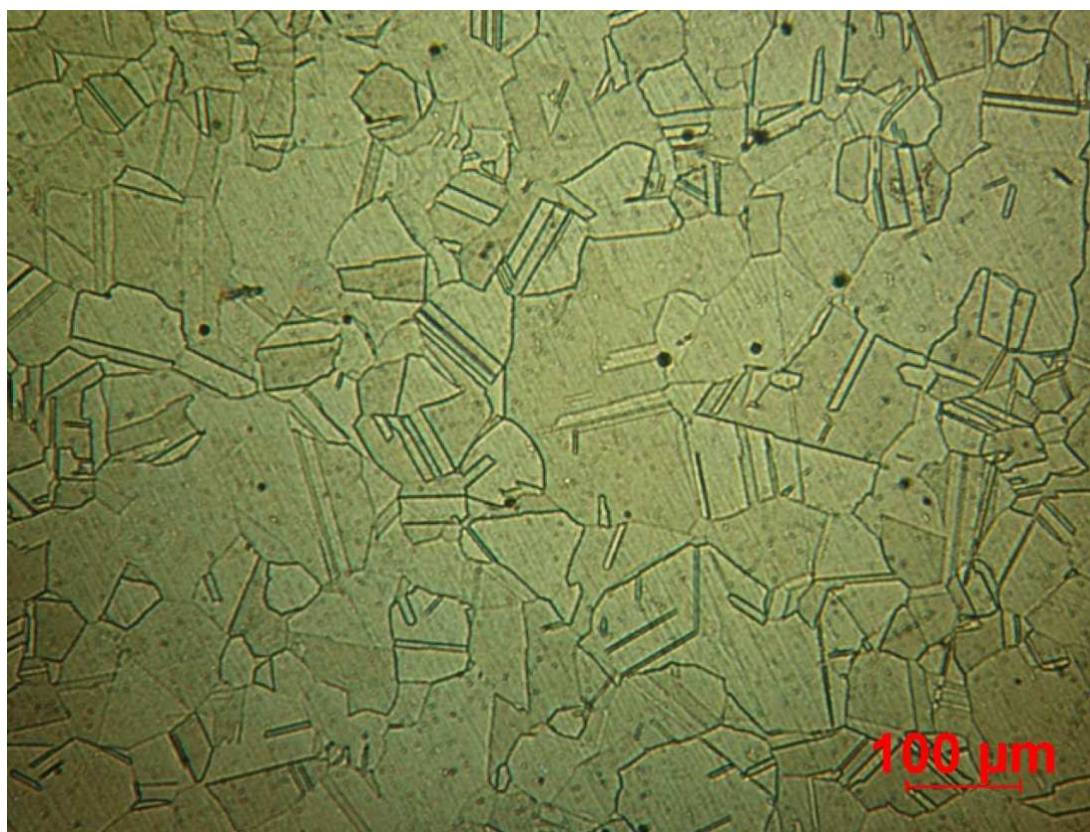
Příloha 4 - HR3C-1000C-4h-Po



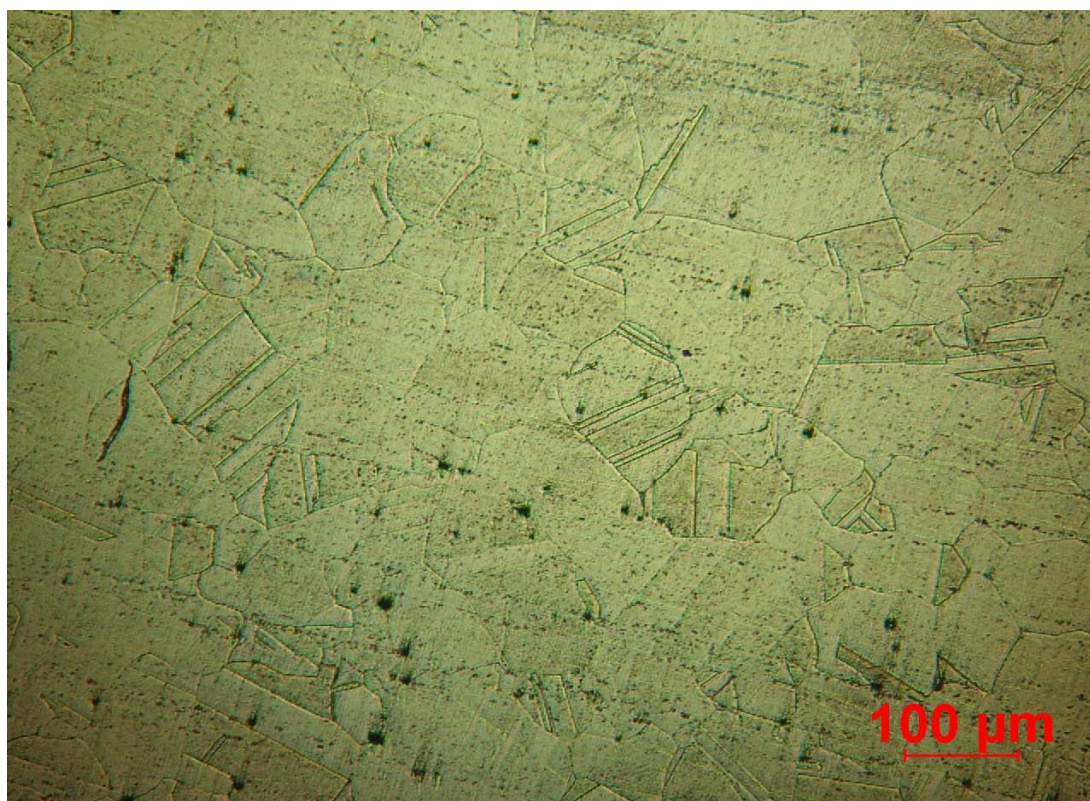
Příloha 5 - HR3C-1000C-8h-Po



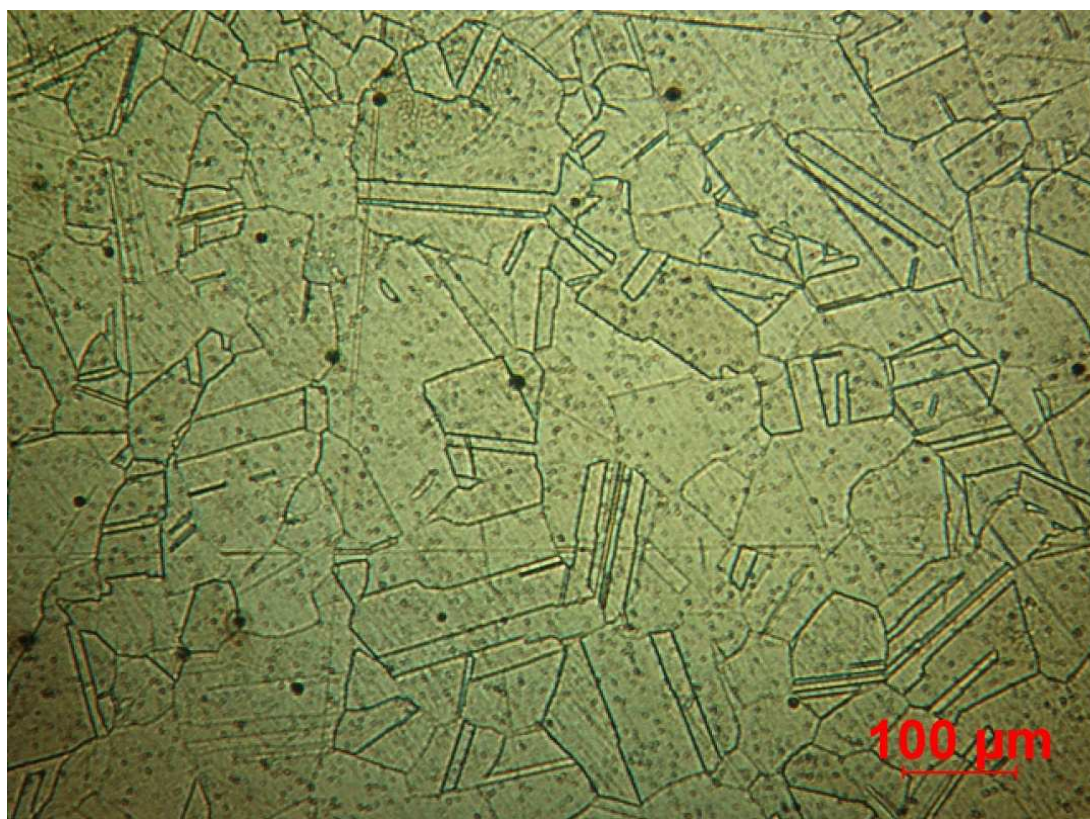
Příloha 6 - HR3C-1100C-4h-Př



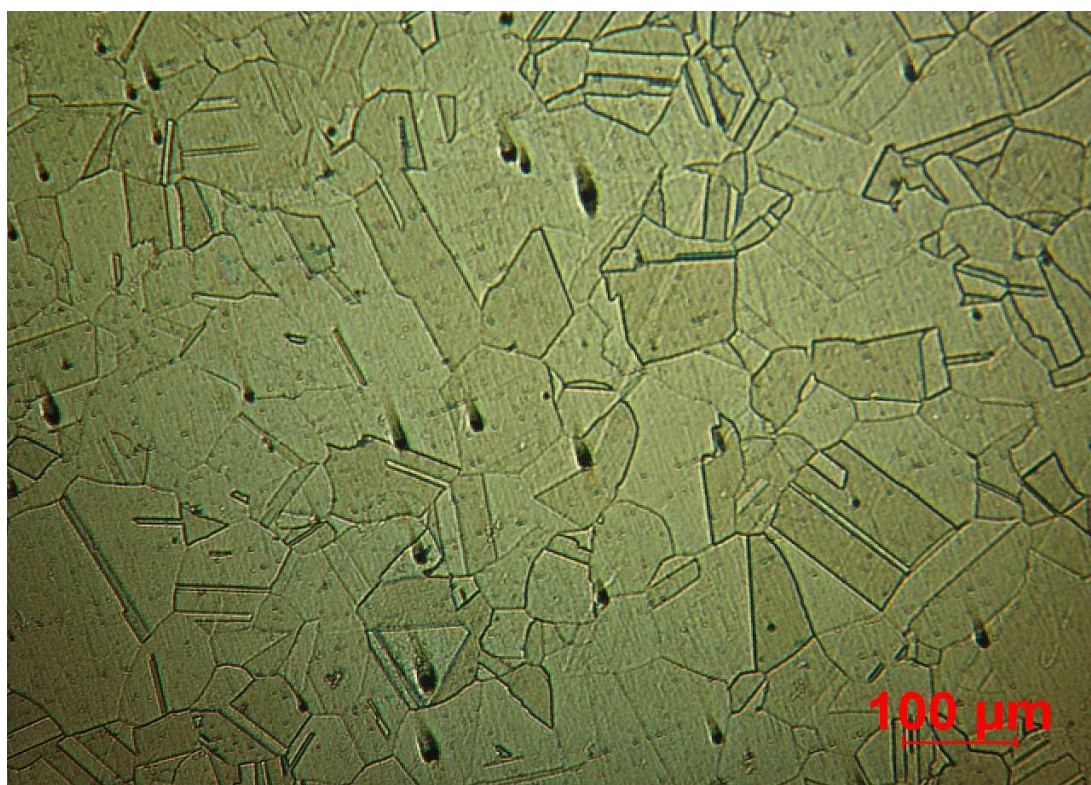
Příloha 7 - HR3C-1100C-4h-Po



Příloha 8 - HR3C-1100C-8h-Př



Příloha 9 - HR3C-1100C-8h-Po



Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121 / 2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

Datum: 24. 5. 2013

Podpis:

Declaration

I have been notified of the fact that Copyright Act No. 121 / 2000 Coll. applies to my thesis in full, in particular Section 60, School Work.

I am fully aware that the Technical University of Liberec is not interfering in my copyright by using my thesis for the internal purposes of TUL.

If I use my thesis or grant a licence for its use, I am aware of the fact that I must inform TUL of this fact; in this case TUL has the right to seek that I pay expenses invested in the creation of my thesis to the full amount.

I compiled the thesis on my own with the use of the acknowledged sources and on the basis of consultation with the head of the thesis and a consultant.

Date: 24. 5. 2013

Signature: